



电力工程设计手册



• 架空输电线路设计 •

中国电力工程顾问集团有限公司
中国能源建设集团规划设计有限公司 编著

Power Engineering Design Manual

中国电力出版社

电力工程设计手册





电力工程设计手册



架空输电线路设计

中国电力工程顾问集团有限公司
中国能源建设集团规划设计有限公司 编著

Power Engineering Design Manual

中国电力出版社

内 容 提 要

本书是《电力工程设计手册》系列手册中的一个分册，是按架空输电线路的设计要求编写的实用性工具书，可以满足交直流架空输电线路设计的内容深度要求。主要内容包括架空输电线路电气、结构的设计原则、设计要点、设计计算、设备材料选择与布置、设计内外接口、设计注意事项等。

本书是依据最新标准的内容要求编写的，充分吸纳了交直流超、特高压架空输电线路建设的先进理念和成熟技术，广泛收集了线路设计的成熟案例，全面反映了近年来架空输电线路建设的新技术、新设备、新材料、新工艺，列入了大量成熟可靠的设计基础资料和技术数据。

本书是从事架空输电线路设计、施工和运行的技术人员和管理人员的工具书，也可作为其他行业从事线路专业设计人员的参考书，还可供高等院校相关专业的师生参考使用。

图书在版编目（CIP）数据

电力工程设计手册. 架空输电线路设计 / 中国电力工程顾问集团有限公司，中国能源建设集团规划设计有限公司编著. —北京：中国电力出版社，2019.6

ISBN 978-7-5198-2578-2

Ⅰ. ①电… Ⅱ. ①中… ②中… Ⅲ. ①电力工程–架空线路–输电线路–设计–手册 Ⅳ. ①TM7–62

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 250068 号

出版发行：中国电力出版社
地　　址：北京市东城区北京站西街 19 号（邮政编码 100005）
网　　址：http://www.cepp.sgcc.com.cn
印　　刷：北京盛通印刷股份有限公司
版　　次：2019 年 6 月第一版
印　　次：2019 年 6 月北京第一次印刷
开　　本：787 毫米×1092 毫米　16 开本
印　　张：65
字　　数：2335 千字
印　　数：0001—3000 册
定　　价：400.00 元

《电力工程设计手册》
编辑委员会

《电力工程设计手册》
秘 书 组

《架空输电线路设计》
编 写 组

主　　编 张国良

副 主 编 陈兴哲

参编人员 （按姓氏笔画排序）

王仲华　刘文勋　刘洪义　刘福海　纪新元　李　龙
李　鑫　李幸周　李晓光　杨礼东　杨振国　吴光臣
何　健　谷仁川　张　健　张　瑚　张广玉　张林枫
张春奎　张洞明　陈　光　赵　伟　赵　峥　赵全江
柏晓路　袁志磊　夏　宇　高培国　高福军　黄　兴
黄金龙　梁　明　韩志军　温作铭

《架空输电线路设计》
编辑出版人员

编审人员 陈　倩　邓慧都　李文娟　刘丽平　华　峰　王春娟

出版人员 王建华　邹树群　黄　蓓　常燕昆　太兴华　郝军燕
李　楠　陈丽梅　马素芳　王红柳　赵姗姗　单　玲

序言

改革开放以来，我国电力建设开启了新篇章，经过40年的快速发展，电网规模、发电装机容量和发电量均居世界首位，电力工业技术水平跻身世界先进行列，新技术、新方法、新工艺和新材料得到广泛应用，信息化水平显著提升。广大电力工程技术人员在多年的工程实践中，解决了许多关键性的技术难题，积累了大量成功的经验，电力工程设计能力有了质的飞跃。

电力工程设计是电力工程建设的龙头，在响应国家号召，传播节能、环保和可持续发展的电力工程设计理念，推广电力工程领域技术创新成果，促进电力行业结构优化和转型升级等方面，起到了积极的推动作用。为了培养优秀电力勘察设计人才，规范指导电力工程设计，进一步提高电力工程建设水平，助力电力工业又好又快发展，中国电力工程顾问集团有限公司、中国能源建设集团规划设计有限公司编撰了《电力工程设计手册》系列手册。这是一项光荣的事业，也是一项重大的文化工程，彰显了企业的社会责任和公益意识。

作为中国电力工程服务行业的“排头兵”和“国家队”，中国电力工程顾问集团有限公司、中国能源建设集团规划设计有限公司在电力勘察设计技术上处于国际先进和国内领先地位，尤其在百万千瓦级超超临界燃煤机组、核电常规岛、洁净煤发电、空冷机组、特高压交直流输变电、新能源发电等领域的勘察设计方面具有技术领先优势；另外还在中国电力勘察设计行业的科研、标准化工作中发挥着主导作用，承担着电力新技术的研究、推广和国外先进技术的引进、消化和创新等工作。编撰《电力工程设计手册》，不仅系统总结了电力工程设计经验，而且能促进工程设计经

验向生产力的有效转化，意义重大。

这套设计手册获得了国家出版基金资助，是一套全面反映我国电力工程设计领域自有知识产权和重大创新成果的出版物，代表了我国电力勘察设计行业的水平和发展方向，希望这套设计手册能为我国电力工业的发展作出贡献，成为电力行业从业人员的良师益友。

汪建平

2019年1月18日

总前言

电力工业是国民经济和社会发展的基础产业和公用事业。电力工程勘察设计是带动电力工业发展的龙头，是电力工程项目建设不可或缺的重要环节，是科学技术转化为生产力的纽带。新中国成立以来，尤其是改革开放以来，我国电力工业发展迅速，电网规模、发电装机容量和发电量已跃居世界首位，电力工程勘察设计能力和水平跻身世界先进行列。

随着科学技术的发展，电力工程勘察设计的理念、技术和手段有了全面的变化和进步，信息化和现代化水平显著提升，极大地提高了工程设计中处理复杂问题的效率和能力，特别是在特高压交直流输变电工程设计、超超临界机组设计、洁净煤发电设计等领域取得了一系列创新成果。“创新、协调、绿色、开放、共享”的发展理念和全面建成小康社会的奋斗目标，对电力工程勘察设计工作提出了新要求。作为电力建设的龙头，电力工程勘察设计应积极践行创新和可持续发展理念，更加关注生态和环境保护问题，更加注重电力工程全寿命周期的综合效益。

作为电力工程服务行业的“排头兵”和“国家队”，中国电力工程顾问集团有限公司、中国能源建设集团规划设计有限公司（以下统称“编著单位”）是我国特高压输变电工程勘察设计的主要承担者，完成了包括世界第一个商业运行的 1000kV 特高压交流输变电工程、世界第一个 ±800kV 特高压直流输电工程在内的输变电工程勘察设计工作；是我国百万千瓦级超超临界燃煤机组工程建设的主力军，完成了我国 70%以上的百万千瓦级超超临界燃煤机组的勘察设计工作，创造了多项“国内第一”，包括第一台百万千瓦级超超临界燃煤机组、第一台百万千瓦级超超临界空冷

燃煤机组、第一台百万千瓦级超超临界二次再热燃煤机组等。

在电力工业发展过程中，电力工程勘察设计工作者攻克了许多关键技术难题，形成了一整套先进设计理念，积累了大量的成熟设计经验，取得了一系列丰硕的设计成果。编撰《电力工程设计手册》系列手册旨在通过全面总结、充实和完善，引导电力工程勘察设计工作规范、健康发展，推动电力工程勘察设计行业技术水平提升，助力电力工程勘察设计从业人员提高业务水平和设计能力，以适应新时期我国电力工业发展的需要。

2014 年 12 月，编著单位正式启动了《电力工程设计手册》系列手册的编撰工作。《电力工程设计手册》的编撰是一项光荣的事业，也是一项艰巨和富有挑战性的任务。为此，编著单位和中国电力出版社抽调专人成立了编辑委员会和秘书组，投入专项资金，为系列手册编撰工作的顺利开展提供强有力的保障。在手册编辑委员会的统一组织和领导下，700 多位电力勘察设计行业的专家学者和技术骨干，以高度的责任心和历史使命感，坚持充分讨论、深入研究、博采众长、集思广益、达成共识的原则，以内容完整实用、资料翔实准确、体例规范合理、表达简明扼要、使用方便快捷、经得起实践检验为目标，参阅大量的国内外资料，归纳和总结了勘察设计经验，经过几年的反复斟酌和锤炼，终于编撰完成《电力工程设计手册》。

《电力工程设计手册》依托大型电力工程设计实践，以国家和行业设计标准、规程规范为准绳，反映了我国在特高压交直流输变电、百万千瓦级超超临界燃煤机组、洁净煤发电、空冷机组等领域的最新设计技术和科研成果。手册分为火力发电工程、输变电工程和通用三类，共 31 个分册，3000 多万字。其中，火力发电工程类包括 19 个分册，内容分别涉及火力发电厂总图运输、热机通用部分、锅炉及辅助系统、汽轮机及辅助系统、燃气-蒸汽联合循环机组及附属系统、循环流化床锅炉附属系统、电气一次、电气二次、仪表与控制、结构、建筑、运煤、除灰、水工、化学、供暖通风与空气调节、消防、节能、烟气治理等领域；输变电工程类包括 4 个分册，内容分别涉及架空输电线路、电缆输电线路、换流站、变电站等领域；通用类包括 8 个分册，内容分别涉及电力系统规划、岩土工程勘察、工程测绘、工程水文气象、集中供热、技术经济、环境保护与水土保持、职业安全与职业卫生等领域。目前新能源发电蓬勃发展，编著单位将适时总结相关勘察设计经验，编撰有关新能源发电

方面的系列设计手册。

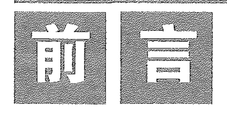
《电力工程设计手册》全面总结了现代电力工程设计的理论和实践成果，系统介绍了近年来电力工程设计的新理念、新技术、新材料、新方法，充分反映了当前国内外电力工程设计领域的重要科研成果，汇集了相关的基础理论、专业知识、常用算法和设计方法。全套书注重科学性、体现时代性、强调针对性、突出实用性，可供从事电力工程投资、建设、设计、制造、施工、监理、调试、运行、科研等工作的人员使用，也可供电力和能源相关教学及管理工作者参考。

《电力工程设计手册》的编撰和出版，凝聚了电力工程设计工作者的集体智慧，展现了当今我国电力勘察设计行业的先进设计理念和深厚技术底蕴。《电力工程设计手册》是我国第一部全面反映电力工程勘察设计成果的系列手册，且内容浩繁，编撰复杂，其中难免存在疏漏与不足之处，诚恳希望广大读者和专家批评指正，以期再版时修订完善。

在此，向所有关心、支持、参与编撰的领导、专家、学者、编辑出版人员表示衷心的感谢！

《电力工程设计手册》编辑委员会

2019年1月10日



《架空输电线路设计》是《电力工程设计手册》系列手册之一。

本书是在总结新中国成立以来，特别是2000年以后架空输电线路设计、施工、运行管理经验的基础上，充分吸收了特高压交直流输电线路建设和运行管理的先进理念和成熟技术，广泛收集输电线路设计的成熟先进案例编写而成。本书全面反映了近年来新建超、特高压输电线路工程中使用的新技术、新设备、新材料、新工艺，对提高架空输电线路设计质量，提升设计水平，实现线路设计的标准化、规范化，促进绿色、节能、环保型线路建设将起到指导作用。

本书以实用性为原则，按照现行相关规范、标准的内容规定，结合架空输电线路的特点，以线路设计专业为单元，分别论述了各专业的设计原则、设计要点、设计计算方法、确定原则、设备材料选型及其布置、相关设计图纸内容、设计内外接口等。

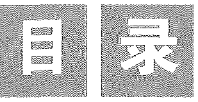
本书主编单位为中国电力工程顾问集团东北电力设计院有限公司，参加编写的单位有中国电力工程顾问集团华东电力设计院有限公司、中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司、中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司。本书由张国良担任主编，负责总体框架设计和校稿，并编写前言、第一章、第三章、参考文献等；陈兴哲担任副主编，负责编写第五章等；夏宇、黄金龙、何健编写第二章；陈光、张洞明、韩志军、张林枫、张瑚编写第三章；赵全江、张林枫、张瑚、刘文勋、柏晓路编写第四章；陈兴哲、纪新元、吴光臣、张洞明编写第五章；高福军、王仲华编写第六章；张广玉、谷仁川、赵伟编写第七章；张健、何健、高培国、李鑫、杨礼东、张春奎编写第八章；刘洪义、李幸周、刘福海、张春奎编写第九章；李龙、杨振国、张健编写第十章；梁明、黄兴、何健、张健编写第十一章；袁志磊、赵峥、温作铭、张广玉、高培国编写第十二章；夏宇、刘洪义、刘福海编写第十三章；黄金龙、刘洪义编写第十四章；张广玉、赵伟、李晓光、黄金龙编写附录。

本书是从事架空输电线路设计、施工和运行的相关技术人员和管理人员的工具

书，可以满足架空输电线路前期工作、初步设计、施工图设计等阶段的深度要求。本书也可作为其他行业从事架空输电线路专业设计人员的参考书，还可供高等院校相关专业的师生参考使用。

《架空输电线路设计》编写组

2019年1月



第一章

输电线路设计内容和流程

架空输电线路是由线路杆塔、导线、绝缘子、金具、拉线、杆塔基础、接地装置等构成，架设在地面之上用于系统两点间传输电能的设施。输电线路分为交流输电线路和直流输电线路。

交直流架空输电线路的设计，一般按设计阶段分为可行性研究设计、初步设计、施工图设计和竣工图设计四个阶段，也可以采用其他的划分形式。

本章主要将可行性研究设计、初步设计、施工图设计、竣工图设计的各卷册、各章节的设计内容及要求予以说明，以便设计人员能掌握全部工程设计程序及应编写的设计内容，以建立整体工程设计概念，并以此对照所编写的设计文件内容是否齐全，是否满足设计深度的要求。

比较简单或小型的设计项目，可将可行性研究设计、初步设计合并设计或简化成为设计原则报告或设计纲要。

设计必须贯彻国家建设的各项方针政策和技术经济政策；遵循规程、规范、现行国家标准及上级机关对工程设计的批示文件；应符合国家基本建设部门颁发的设计文件编制、审批办法的有关规定和各部委颁发的现行技术标准、规程、规范、导则等有关规定。设计的工程应做到安全可靠、技术先进、经济适用。

第一节　可行性研究设计

可行性研究是基本建设程序中为项目核准提供技术依据的重要设计阶段。通常 110kV 及以上新建、扩建、改建的交直流输变电工程均要做可行性研究设计，其他小型工程可根据情况确定是否需进行可行性研究。

输电线路工程的可行性研究一般与输变电工程（包括系统、输电、变电工程）可研同步进行，是其中的一个重要的组成部分。

输电线路工程可行性研究必须贯彻国家技术政策和产业政策，符合国家现行的有关设计标准的规定；推进资源节约型、环境友好型线路的建设，积极稳妥地采用新技术，提高输电线路建设的技术水平；注重环境保护，促进节地、节能、节材；降低输电成本，控制工程造价，提高输电线路工程的建设效益。

可行性研究设计应对新建线路的路径方案进行全面的技术经济比较。对于大跨越工程的跨越点位置，应结合一般段线路的路径方案进行全面的技术、节能及经济比较，并进行必要的调查、资料收集、勘测和试验工作，提出推荐意见。

根据国家有关规定，视工程具体情况，需取得县乡级以上的规划、国土、林业、地矿、文物、环保、地震、水利（水电）、通信、文化、军事、航空、铁路、公路、供水、供电等部门对工程建设的意见。线路进入自然保护区、风景区、水源地等敏感区域，需取得主管部门同意的意见和跨越林地等的协议证明。需对方案的节能降耗效益和抵御自然灾害能力进行分析。

可行性研究报告线路部分应给出线路路径方案、工程设想、投资估算以及相应的附件和附图。一般情况，尚应提出正式的环境影响、水土保持、压覆矿产、地质灾害、地震灾害及文物等的评估报告。

根据 DL/T 5448—2012《输变电工程可行性研究内容深度规定》的规定，输电线路可行性研究报告应包括线路路径选择及工程设想、投资估算等内容。

一、线路路径选择及工程设想

（一）工程概述

1. 编制依据

说明工程建设的依据，包括经批准或上报的前期工作审查文件或指导性文件，与本工程有关的其他重要文件以及与委托方签订的设计咨询合同或设计委托函等。

2. 工程概况

简述工程概况，包括电网规划情况及前期工作情况。说明变电站（包括换流站、升压站、开关站、终端站）的地理位置与网络位置，线路工程所经过地区的行政区划，工程规模及协议落实情况等。对改、扩建工程，应简述先期工程情况，简述近期电力网络结

构，明确与本工程相连的线路起讫点及中间落点的位置、输电容量、电压等级、回路数、线路长度、导线截面及是否需要预留其他线路通道等。同时，应说明线路工程的投资估算。

3. 设计水平年

根据电网规划，合理选定工程设计水平年及远景水平年。远景水平年用于校核分析，应取设计水平年后5～15年中的某一年。

4. 主要设计原则

根据电网规划的要求，并结合工程设计条件提出输电线路工程项目的设计特点和相应措施；简述主要设计原则和设计指导思想；列出工程设计遵循的主要规程、规范。

5. 设计范围及分工

说明设计应包括的内容和范围、与外部协作项目以及设计的分工界限。对改、扩建工程，说明原有工程情况与本期建设的衔接和配合。

6. 给出主要结论

（二）线路路径选择及工程设想

1. 路径选择基本要求

应结合系统论证、站址（包括直流接地极线路的接地极极址）选择等，开展路径选择工作。输电线路路径选择应充分考虑地方规划、压覆矿产、自然条件（海拔、地形地貌）、水文气象条件、地质条件、交通条件、军事设施、自然保护区、风景名胜和重要交叉跨越等，重点解决线路路径的可行性问题，避免出现颠覆路径的因素，并应注意以下两点：

（1）应结合系统规划的结论，说明线路起讫点及中间落点的位置、输电容量、电压等级、回路数、导线截面及是否需要预留其他线路通道。说明变电站进出线位置、方向，与已建和拟建线路的相互关系。对新建变电站需做好进出线走廊统一规划，明确近远期过渡方案。

（2）原则上应选择两个及以上可行的线路路径进行比选，并在此基础上提出推荐路径方案。应优化线路路径，避开环境敏感区，降低线路走线对环境的影响。宜采用高分辨率卫星影像或航空影像、全数字摄影测量系统等技术辅助路径大方案的选择，力求准确提供沿线地形、地貌、地物等基本特征，准确提供走廊清理工程量，优化线路路径。

2. 线路路径方案的选择

根据室内选线、现场勘查、收集资料和协议签订情况，一般应提出两个及以上可比的路径方案进行比选。线路中若有大跨越，还应结合跨越点位置、跨越方案等进行方案比选。明确线路进出线位置、方向，以及与已有、在建和拟建线路的相互关系；重点比选拥挤地区，重要协议规划区、特殊地形、地质地貌区，特殊水文气象区以及主要交叉跨越等线路关键点情况等。

路径方案应着重说明各路径方案的起讫点，所经市、县名称，沿线自然条件（海拔、地形地貌），水文气象条件（含江河、湖泊、水源保护区、蓄洪区、滞洪区、泄洪区、海湾、海峡、大型水利枢纽工程、雷电活动情况、微气象条件），地质条件（含不良地质及矿产分布），交通条件，城镇规划，军事设施，自然保护区，风景名胜和重要交叉跨越等。

分析各方案对电信线路和无线电设施的影响。分析各方案林木砍伐和拆迁情况，提出跨越树木的长度及主要树种的自然生长高度。论述线路走廊能否满足终期走线的要求。同一方向线路，需对采用同塔双回、多回路进行论述。对必选方案进行技术经济比较，说明各方案路径长度、地形比例、曲折系数、房屋拆迁量、节能降耗效益、主要材料耗量、投资差额等，并在列表进行比较后提出推荐方案。

在提出推荐的路径方案后，应说明该方案与沿线主要部门原则协议（各级规划、保护区、风景名胜区、其他军事及民用设施等）情况，推荐路径沿线水文、地质、地形、地貌、地物情况等。

3. 一般线路的工程设想

（1）简述线路建设的必要性及其结论。提出工程的主要设计气象条件，重点说明设计基本风速及覆冰情况的选取，对特殊气象区需详细调查、论证，在此基础上提出设计气象条件一览表。

（2）根据系统要求的输送容量及沿线海拔、冰区划分、大气腐蚀等条件选定导线型号。根据导地线配合、地线热稳定、系统通信等要求，推荐地线型号。列出推荐的导地线机械电气特性，提出防振动方案及防舞动措施。

（3）确定污区等级及绝缘配置原则，选择绝缘子型式及片数，确定塔头空气间隙，提出防雷接地措施等。

（4）结合工程特点，进行全线杆塔荷载及塔头系列规划并提出杆塔主要形式。结合工程情况及结构设计特点，提出可行的杆塔结构方案；提出主要推荐的基础形式；提出特殊气象区的杆塔型式及不良地质条件下的基础形式推荐方案。

（5）提出环境评价、水土保持、节能措施，给出抵御自然灾害的能力、劳动安全与防护措施等。

4. 大跨越段线路跨越位置的选点及工程设想

根据大跨越段线路的不同规模，可作为单独的工程，也可与一般线路共同作为一个工程进行设计。与一般线路共同作为一个工程可独立编成一个卷册或一个章节。为此应完成以下各项工作：

跨越位置的选择应解决跨越位置的可行性，避免

出现颠覆性因素，为此应做好以下几点：①每个工程原则上应提出两个及以上可比的跨越位置方案，并对各方案进行有关方面的论述。②简述各方案所经市、县名称，沿线的海拔、地形、地质、水文、城镇规划、自然保护区、军事设施、矿产分布、环境特点和交通等自然条件。③说明跨越点位置的区域地质、区域构造和地震活动情况，确定地震基本烈度。④说明跨越点位置的地形、地貌特征，地质岩性、岩土结构、成因类型及分布，确定地基类型；了解跨越点位置及附近地区的不良地质现象，并对其危害程度和发展趋势做出判断，提出防治措施的建议。⑤提出跨越位置工程水文条件及防洪影响评价情况；说明河道河床条件，岸线稳定情况，设计水位及堤防情况，并对防洪影响情况做出初步判断，提出防治措施的建议或结论意见。⑥根据地形、地质、通航、航空、施工运行条件等确定跨越方式、档距、塔高，并根据系统规划、通道资源利用情况，确定回路数及投资估算。⑦分析各方案对通信线路和无线电设施的影响。⑧简述各方案林木砍伐和拆迁情况，并进行环境保护初步分析。

根据以上论述，对比选方案进行技术、节能、经济比较，提出推荐方案。结合一般段路径方案，说明各跨越方案技术条件、主要材料耗量、投资差额等，并在列表进行比较后提出推荐方案。说明推荐跨越点位置方案与沿线县市以上规划、国土、航道、水利、林业或政府主要部门原则协议情况。线路经过自然保护区、风景区、水源地等敏感区域，需取得主管部门的同意意见。

与一般段线路不同，由于大跨越方案设计的差异性及特殊性，在进行跨越位置选择的同时，即应进行不同跨越方案的工程设想，并参与跨越方案的比选。为此应进行的各项工作包括：①给出跨越方案的设计基本风速、设计覆冰情况等设计气象条件。②根据系统要求的输送容量、工程海拔、气象条件及大跨越状况等，进行技术经济比较，推荐选定的导线型式、型号及导线分裂型式。③根据导地线配合、地线热稳定、系统通信等要求，推荐地线型号。④列出推荐的导地线机械电气特性，并说明导地线防振、防舞动措施。⑤根据塔高、沿线污区等级及导地线使用情况，提出绝缘子和金具型式、绝缘子使用片数、塔头间隙尺寸以及防雷接地方案。⑥给出塔高和塔头布置，并进行技术经济比较选择确定塔头型式尺寸及材质。⑦结合跨越点的工程地质、水文地质情况，提出推荐的基础形式。⑧结合工程特点，提出大跨越塔的附属设施，并做说明。

5. 其他应说明的问题

（1）应进行输电线路节能措施分析和抵御自然灾害评估。线路节能分析应从导线型式、导线材质、架设方式以及金具所用材质等方面论述线路的节能降耗措施。抵御自然灾害评估应针对地震、雪灾、冰灾、台风和洪水等自然灾害进行抗灾评估，说明输电线路路径沿线的覆冰、风力等情况，以及线路的设防标准。

（2）对线路的环境保护做出评价，着重说明线路环境概况，给出线路对电磁及声学环境、水土保持等生态环境和重要交叉跨越可能的影响，并提出施工和运行期环境影响的治理措施等。

（3）提出劳动安全与劳动防护的对策与措施。应根据劳动安全的法律、条例、国家标准的有关规定，对危险因素进行分析，对危险区域进行划分，并采取相应的防护措施。对作业场所、辅助建筑、附属建筑、生活建筑、易燃易爆的危险场所以及地下建筑物应设计防火分区、防火隔断、防火间距、安全疏散通道和消防通道。高杆塔应采取高空作业人员的防坠安全保护措施，以及在架线、组塔高空作业时的安全措施等。

（4）应列出附录、附图及附件。附录中应给出输电线路路径原则协议。附图应给出线路路径图（1∶50000～1∶100000），大跨越路径方案图，大跨越平断面图，杆塔和基础形式规划图。附件可包括测量、地质及水文勘测报告。

二、投资估算

根据推荐路径和工程设想的主要技术原则、方案及工程量，编制输电线路工程投资估算，其内容及表达形式应满足控制工程概算的要求。估算应包括工程规模、估算编制说明、估算造价分析、总估算表、单位工程估算表、其他费用计算表、建设场地征用及清理费用估算表、编制年价差计算表、建设期贷款利息计算表及勘测设计费计算表等。

编制说明应包括估算编制的主要原则，采用的定额、指标以及主要设备材料价格，建设场地征用及清理费用计算依据等，并应列出主要技术经济指标及主要建设场地征用和清理费用指标等。

估算造价应与类似工程的造价、最新的《电网工程限额设计控制指标》进行对比，并结合工程特点对工程量及投资合理性进行分析。

第二节 初 步 设 计

初步设计是工程设计的重要阶段，这一阶段应明确主要设计原则。初步设计的技术原则应符合国家现行的标准、规范的规定。初步设计阶段应着重对不同的线路路径方案进行综合的技术经济比较，取得有关协议，选择最佳的路径方案；充分论证气象条件、导线和地线、绝缘配合及防雷设计的正确性，确定各种电气距离；认真选择杆塔和基础形式；合理地进行通信保护设计。对于严重的污秽区、大风和重冰雪地区、

不良地质和洪水危害地段、特殊大跨越设计等均要列出专题进行调查研究，提出专题报告；根据工程的特点及设计的实际情况，列出新技术的科研专题，把科学实验的成果用于工程设计中。各项设计均应做出安全可靠、技术经济合理的设计方案进行优选。设计必须从实际出发，结合国情和地区特点，积极慎重地推广、使用成熟的新设备、新材料、新工艺等先进技术。

在初步设计阶段为了确定设计原则，需编写如下文件：

（1）初步设计书及有关图纸；

（2）估计主要设备材料的数量，并编制主要设备材料清册；

（3）为了有计划地进行经济建设，合理地使用资金、安排工程投资，需编写概算书；

（4）大型工程为了合理地组织施工，需编写施工组织设计；

（5）工程勘测报告，包括测量工程报告、岩土工程报告、水文气象报告；

（6）工程有关的专题研究报告；

（7）工程需要开展的试验研究项目立项报告；

（8）外委项目的设计文件。

上述设计文件应充分表达设计意图，内容应完整齐全、计算准确、文字说明严谨、图纸清晰正确、各级签署齐全。对于包含外委项目或分段设计的初步设计文件，主体设计单位应负责概算汇总。

一、初步设计说明书

初步设计说明书首先应列出卷册总目录、分卷目录、附件目录及附图目录。初步设计说明书包括以下内容：

（一）总论

（1）设计依据。应列出：工程设计相关的国家政策、法规和规定；工程设计有关的规程、规范；政府和上级有关部门批准、核准的工程文件；可行性研究报告及评审文件；设计中标通知书、委托文件或设计合同；城乡规划、建设用地、水土保持、环境保护、防震减灾、地质灾害、压覆矿产、文物保护及劳动安全卫生等相关依据。

（2）设计规模及范围。设计规模是根据工程设计委托书或设计合同的要求，说明线路的电压等级，输送电力容量及导线截面，线路起讫点、长度、回路数，中间落点及连接方式等。

设计范围一般包括线路的本体设计、通信保护设计、工程概算、运行维护的辅助设施和施工组织大纲等。还应说明线路是否包括降压运行的设计，进出两端变电站临时线的设计及检修站、巡线站的建筑设计等。

（3）建设单位、设计单位及建设期限。

（4）电力系统简况。重点说明电力系统电网现状及发展规划，输送容量及导线截面选择，两端变电站进出线间隔。

（5）主要技术经济特性。主要包括线路路径长度、曲折系数、线路回路数、主要气象条件、导地线型号、杆塔形式、基础形式等；还应包括沿线地形、地质比例，海拔分布和交通概况。主要技术指标见表 1-1；主要经济指标及对比见表 1-2。

表 1-1　　主要技术指标

项目名称	导线（t/km）	塔材（t/km）	基础钢材（t/km）	混凝土量（m^3/km）	土石方量（m^3/km）	房屋拆迁量（m^2/km）	林区长度（km）	林木砍伐量（亩）
数量								

表 1-2　　主要经济指标及对比

项目＼造价	初设概算		可研估算		初设-可研	
	总投资（万元）	单位投资（万元/km）	总投资（万元）	单位投资（万元/km）	差值（万元）	百分比（%）
一般线路本体工程投资						
大跨越本体工程投资						
其他						
其中：场地征用及清理费						
静态投资						
动态投资						
投资差别主要原因						

（二）线路路径

（1）发电厂和变电站的进出线布置。应说明两端及中间变电站进出线的位置、方向和终端塔布置；说明与已有和拟建线路的关系，以及近远期过渡方案等。

（2）线路路径方案。应论述线路路径选择的原则和方法；描述各路径方案的特点，包括线路走线、行政区、沿线海拔、地形、地质水文、地震烈度、交通运输条件、林区、矿产、微地形及微气象区、主要河流、城镇规划、风景名胜区、保护区、其他主要设施及主要交叉跨越等。说明各路径方案对电信线路和无线电台（站）的影响；说明各路径方案的房屋（含厂矿）、林木等走廊清理及主要交叉跨越等的类型、规模和数量，包括厂矿企业拆迁规模和数量、民房拆迁面积及主要结构类型、电力线、通信线、广播线拆迁数量、其他拆迁数量、林区长度、树木种类及砍伐数量，主要交叉跨越数量等；说明各路径方案沿线相关的单位协议情况，以及路径特殊地段采取的处理措施、各路径方案技术经济比较和论证结果。简要说明推荐路径方案，所处的行政区，以及地形比例、海拔、房屋（含厂矿）及林木等走廊清理、主要交叉跨越等。

路径选择应避开军事设施、大型工矿企业及重要设施等，符合城镇规划；宜避开不良地质地带和采动影响区、重冰区、导线易舞动区及影响安全运行的其他地区；宜避开原始森林、自然保护区和风景名胜区，并应考虑电台、机场、弱电线路等邻近设施的相互影响。

（三）气象条件

（1）气象条件的选择。应收集气象资料，并说明气象资料的来源，包括气象台（站）的名称、与线路的相对关系（包括方位、距离），周围环境，风速记录仪类型及记录方式，冰雪资料的观测方式，记录年代等。

设计基本风速的选取应根据气象台（站）所记录的风速资料，经数理统计换算为工程需要的风速值，并与 GB 50009《建筑结构荷载规范》风压分布图所示风压值进行对照。在此基础上，再参照所经地区已有线路的运行经验及沿线风灾资料进行综合分析，提出工程设计采用的基本设计风速。必要时，尚需提出需进行设计验算的稀有风速及区段。

覆冰厚度的选取应根据气象台（站）的观测资料，以及附近已有线路（电力线、通信线）、建筑物、树木等的覆冰资料予以选定。对有严重覆冰的微气象地区，尚应提出验算（或设计）的覆冰厚度及区段。

最高气温、最低气温、雷暴日数及土壤冻结深度则主要根据沿线气象台（站）的记录予以选定。对雷电活动较强烈地区的雷暴日数，亦可通过收集沿线各地区电力公司已有的雷电活动定位资料予以确定。

年平均气温的选取决定导、地线全年平均运行张（应）力水平的大小，也是导、地线张（应）力设计控制条件之一。根据我国东北地区 60 多年的设计运行经验，考虑到每年长达 5～6 个月的冬春季气温较低，为确保导、地线运行安全，已有线路设计选用的平均气温均远低于实际气象台（站）所观测的气象资料统计的年平均气温，而接近于年平均最低气温或冬季（11 月—次年 3 月）平均气温，且线路运行情况良好，因此，在选择寒冷地区观测设计用年平均温时应考虑这一情况。

（2）给出设计采用的气象条件成果表见表 1-3。

表 1-3　　设计气象条件成果表

气象条件	气温（℃）	风速（m/s）	冰厚（mm）	备注
最低气温				
年平均气温				
基本风速				
覆冰				
最高气温				
安装				
雷电过电压（无风）				
雷电过电压（有风）				
操作过电压				
验算覆冰				
验算大风				
年均雷暴日数				
冰的密度（g/cm^3）				

（四）导线和地线

（1）导线选型。根据系统要求的输送容量确定导线截面，并结合工程特点，如海拔、覆冰值、大气腐蚀和电晕、无线电干扰、可听噪声等因素，选择技术上满足系统、环境影响及施工、运行维护等要求的导线方案，在对导线进行技术方案比较的基础上，还应进行导线方案经济性的比较，即进行初投资与年费用的比较，并以年费用最低者为优，最后确定导线型号及规格。采用分裂导线时需论述导线分裂根数、分裂间距和排列方式。

（2）地线选型。根据系统通信、导线地线配合、地线热稳定和电晕等条件确定地线型号；采用良导体地线时，应论证其必要性并进行技术经济比较；采用 OPGW 时，应论证 OPGW 及分流地线选型。

（3）防振设计。确定导线和地线（含 OPGW）的最大使用张力，平均运行张力及其防振措施。

（4）防舞设计。工程设计时，首先应经过调查，确定所经地区是否属于易舞动地区。对经过易舞动地区的线路须进行必要的舞动情况及气象、地形条件的调研分析，并采取合理的防舞动措施。

（5）列表给出导线和地线（含 OPGW）的机械电气特性。

（五）绝缘配合

（1）污区划分。污区划分应参照现行国家标准 GB/T 26218《污秽条件下使用的高压绝缘子的选择和尺寸确定》的有关规定，并参照线路所经地区审定的污区分布图，在对沿线等值附盐密度、灰密、污湿特征、污染源和运行经验调查分析的基础上，结合污秽发展情况，确定污秽等级及区段划分。

（2）绝缘子选型。分析论述盘式（瓷、玻璃）、棒式（复合、瓷棒）等绝缘子技术特点，结合运行经验和工程实际情况，推荐绝缘子型式。

（3）绝缘子强度选择。一般地区绝缘子强度按照规程要求的安全系数选择，易舞区则需适当加强绝缘子强度。

（4）绝缘子片数选择。首先应按爬电比距法或污耐压法确定工频（或工作）电压要求的绝缘子片数。其次则应论述操作过电压和雷电过电压要求的绝缘子片数。在覆冰严重地区还应满足冰闪对绝缘子片数的要求。高海拔地区绝缘子片数则应按相关规定进行修正。最终给出绝缘子型式、片数、联数的配置及其机电特性。

（5）空气间隙。给出各种运行工况下相应的空气间隙值。高海拔地区的空气间隙值应按相关规范进行修正。

（六）防雷和接地

（1）防雷设计。调查沿线雷电活动情况和附近已有线路的雷击跳闸率；根据防雷需要，确定导线布置形式和保护角，以及档距中央导线与地线的最小距离；计算基本塔型的耐雷水平和雷击跳闸率。对雷电活动较多地区和特殊区段应提出相应的防雷措施。

（2）接地设计。提出杆塔接地装置型式与接地电阻要求，并根据需要提出接地装置的防腐降阻措施。

（3）地线绝缘设计。论述地线绝缘的目的、使用地段、绝缘方式、绝缘子片数和联数、间隙取值，给出地线绝缘子型号及其机械电气特性。

（七）绝缘子串和金具

说明导线和地线的悬垂串、耐张串组装型式和特点。导线悬垂串采用 V 型、Y 型等绝缘子串时应提出防掉串措施。给出各种工况下绝缘子串和金具的安全系数，说明接续、防振等主要金具的型式及型号，以及绝缘子串的均压和屏蔽措施，同时尚应说明分裂导线采用的间隔棒型式及布置方式。对易舞动地区则应说明金具及跳线的防舞设计措施。当采用新型金具时，则应说明新型金具的作用及其机械电气特性，并提交必要的试验鉴定资料。

（八）导地线换位及换相

说明两端和中间变电站相序，以及导线是否需要换相或换位；说明导线换位次数、换位节距、换位方式及换位杆塔形式，并按导线换位或换相情况给出换位或换相布置图。说明地线是否换位及其换位方式。

（九）导线对地和交叉跨越距离

给出导线对地及对各种交叉跨越物的最小距离；说明沿线林木分布状况及主要树种类型、自然生长高度、林木跨越及砍伐原则；说明主要交叉跨越物的跨越原则；说明各种交叉、平行金属管道跨越的技术要求和防护措施，以及线路走廊清理原则。

（十）杆塔规划

给出导地线排列方式和塔头间隙，以及塔型选择；给出直线型杆塔、直线转角杆塔及耐张杆塔的荷载及塔头系列规划；列表给出杆塔规划成果及杆塔使用条件。

（十一）杆塔

提出全线杆塔结构的选用原则，进行杆塔结构的选择；论述新型杆塔的技术经济特点和使用意义。对需做试验的杆塔应给予说明，并对试验的目的、试验项目和经费等提出立项报告。当套用其他设计的杆塔图纸时，需说明杆塔的原设计条件及适用情况。应充分说明杆塔主要荷载的取值原则、杆塔材料的材质、强度等级、杆塔防腐措施、登塔设施、螺栓的防卸及防松措施、杆塔防鸟害措施、易舞区杆塔采取的局部加强措施和螺栓的防松措施等。对位于地震烈度为 7 度及以上地区的混凝土高塔和位于地震烈度为 9 度及以上地区的各类杆塔应进行抗震设计或验算。给出全线杆塔汇总表，包括杆塔的呼称高及材料用量。

（十二）基础

说明沿线的地质和水文情况、土壤冻结深度、地震烈度、施工条件。对软弱地基、膨胀土、湿陷性土等较难处理的地质需做详细的描述，并综合地形、地质、水文条件以及基础作用力，选择适当的基础类型。说明各种基础形式的特点、适用地区及适用杆塔的情况；论证新型基础的技术特点、经济效益、安全性和施工可行性。需做试验的基础，应说明试验目的、方案和费用等并提出专项报告。线路通过软地基、湿陷土、腐蚀性土、活动沙丘、流沙、冻土、膨胀土、滑坡、采空区、地震烈度强的地区等不良地质地段时，应论证采取的措施，并说明线路基础材料的种类、等级和强度等级。线路经过直流接地极附近时，需说明

基础的防护措施。

（十三）通信保护

1. 设计原则和依据

列出中性点接地系统单相零序短路电流计算结果及所依据的电力系统发展规划期限；说明线路沿线大地电导率分布及取值；收集线路影响范围内电信线路、无线电台站的位置及资料，绘制沿线影响范围内与电信线路（含架空线和地下电缆）接近的位置平面图。

2. 计算分析及推荐意见

对邻近电信线路进行危险和干扰影响计算，并对屏蔽系数、降低系数等参数进行分析和选用；结合工程具体情况，对采用的防护措施进行技术经济比较、提出推荐方案；列出沿线各电信线路的影响计算结果及其防护措施一览表，其中包括电信线路所属单位、型式、等级，感应总电动势、对地电压、噪声电动势的最大值，防护措施、协议情况等；列出对沿线无线电台的影响计算结果及其防护措施。

（十四）环境保护和劳动安全

1. 环境保护

说明线路电磁环境影响和其对区域环境的影响程度，并提出为减小对环境影响所采取的措施；说明线路对相关自然保护区、风景名胜区、生态保护区等的影响情况；说明水土流失及植被保护措施；提出施工和运行的环保注意事项。

2. 劳动安全

说明线路工程应满足国家规定的有关劳动安全与卫生等的要求，以及高空作业人员的安全保护措施；说明线路受到邻近输电线路电磁感应影响的区段，提出施工应采取的安全措施；说明与线路平行和交叉的其他电力线的情况，并提出邻近线路在运行和检修时需要采取的安全措施。

（十五）附属设施

说明配备的交通工具，以及通信方式和设备；列出检修工器具及备品、备件的配置与数量；提出杆号牌、相序牌、警示牌等线路运行设施的数量及规格；必要时提出线路在线监测方案。

（十六）附件

线路初步设计附件应包含：与工程有关的主管部门文件和批文；可行性研究报告的评审意见；工程设计委托文件；输电线路建设所涉及的有关单位协议和会议纪要；外委项目有关协议等。

（十七）研究试验项目

列出研究试验项目清单和项目立项报告。

（十八）大跨越说明书

线路跨越通航大河流、湖泊或海峡等，因档距较大或杆塔较高，导线选型或杆塔设计需特殊考虑，且发生故障时严重影响航运或修复特别困难的耐张段，需按大跨越进行设计。由于大跨越的重要性和复杂性，需要对大跨越段进行加强设计。大跨越段设计必要时可单独列为单项工程或列为初步设计文件中的一卷。初步设计阶段，大跨越段路径的测量、水文、地质勘察等应达到施工图设计深度的要求。

1. 路径方案及规模

大跨越路径应结合全线路径进行多方案技术经济比较后提出推荐方案；应详细说明推荐方案和跨越点的情况；应论述大跨越回路数，特别当陆上段采用单回路时，要论述大跨越是否应采用双回路。

2. 气象条件

在一般线路气象条件选择的基础上，按大跨越设计要求，进一步分析论证大跨越段采用的设计和验算气象条件。

列出大跨越段设计和验算气象条件组合一览表，见表 1-3。

3. 导、地线选型

按允许载流量确定大跨越导线截面，并结合导线型号规格、分裂根数以及塔高、基础、施工与制造等因素，进行技术经济比较后提出导线推荐方案。地线（含光纤复合架空地线，optical fiber composite overhead ground wire，OPGW）的型号应根据系统通信、导地线配合、地线热稳定、雷击性能和电晕等条件确定。导地线的机械特性宜精确计算；列出导地线的机械和电气特性。

4. 绝缘配合和防雷接地

大跨越高杆塔的绝缘配合应根据防雷要求，并结合运行经验、跨越档距和导线最大使用张力等综合分析论述，确定绝缘子的型式、片数、联数和相应的空气间隙。列出绝缘子的机械和电气特性；校验大跨越塔的耐雷水平，提出大跨越的防雷方案及塔的接地设计方案。

5. 绝缘子串和金具

除满足一般线路条件外，还应按线路荷载大、杆塔高、绝缘子片数多、吨位大的情况来选择或新设计绝缘子串及金具。给出各种工况下绝缘子串和金具的安全系数；论述采用特殊金具的必要性；给出导地线悬垂线夹、耐张线夹、联结金具的选型原则及绝缘子串组装方式。

6. 塔头布置和塔高

说明导线间和导、地线间各种距离的选择原则，验算导地线覆冰时的静态接近、脱冰时的动态接近、舞动接近、雷电反击或绕击，以及导地线位移和档距中央接近距离的要求，提出推荐的塔头布置；结合不同塔头布置形式、导地线比选和通航要求等，进行各种塔高的技术经济比较，推荐出拟采用的塔型和塔高。

7. 杆塔荷载

说明大跨越杆塔正常、断线和安装工况下的荷载及其组合方式，以及直线型杆塔、耐张型杆塔在正常、断线和不均匀覆冰工况下纵向荷载的取值。安装条件和附加荷载按有关规定选取，并按规定进行抗震验算。

8. 杆塔

钢管塔、角钢塔、钢管角钢组合塔等大跨越杆塔的结构型式的比较和选择应根据加工制造、施工、运行、投资及周围环境等因素进行论证分析，提出推荐意见；应详细说明杆塔材料截面、型式和等级。杆塔结构的连接方案，杆塔的防腐措施，以及螺栓的材料和防卸、防松等措施。

9. 基础

对塔位的地形地貌、地质及水文情况进行描述。根据水文、地质资料、基础作用力，结合施工条件给出基础的推荐意见；说明地震、洪水冲刷等对基础的影响和防护措施；列出基础采用的材料种类及强度等级。必要时提出试桩方案。

10. 防振和防舞措施

大跨越导、地线（含 OPGW）平均运行张力的上限应根据防振措施、结合运行经验进行详细论述，并提出推荐值；提出导、地线的防振设计方案。必要时提出大跨越的防舞方案。

11. 登塔设施

结合塔型和运行条件等情况，对电梯、爬梯、自动升降设备、脚钉等登塔设施进行比较，提出推荐方案。

12. 辅助设施

说明航空、航运警示标志方案，以及施工和运行维护电源方案；如需设置运行房屋、围墙、道路等设施，需对方案进行说明。给出大跨越备品、备件的配置与数量。

（十九）附图

1. 必备图纸

一般线路段：应提供线路路径方案图（可按 1∶500000、1∶100000、1∶50000、1∶10000 等比例，推荐路径方案一般按 1∶50000）；变电站进出线示意图；导线全线相序示意图；导线特性曲线或表；地线或 OPGW 特性曲线或表；主要型式绝缘子串及金具组装图；杆塔、基础形式一览图；输电线路单相接地零序短路电流曲线；接地装置图。

大跨越段：应提供路径方案图；平面断面图；导、地线特性曲线或表；绝缘子串及金具组装图；杆塔、基础一览图。

2. 视情况需要的图纸

一般包括：拥挤地段平面图；特种（或新设计）金具图；与路径方案相关的其他图；沿线海拔高程图；电力系统现状地理接线图；电力系统远景地理接线图；主要新设计杆塔的间隙圆图；110kV 及以上电力线路、铁路、高等级公路、航道等主要交叉跨越相对位置图及交叉跨越图；T 接或 π 接线路整体路径方案示意图；输电线路与电信线路接近位置平面图；主要房屋拆迁平面图或相应图片资料。

二、主要设备材料清册

（一）工程概况

包括输电线路的电压等级，回路数，线路起讫点及路径长度，全线地形情况，污秽区情况，导线和地线型式，导线和地线悬垂、耐张串的绝缘子型式、片数和金具情况，杆塔和基础形式及数量等。

（二）编制依据

以工程设计任务书或设计合同、有关上级文件、工程设计资料为依据。

（三）建设期限和施工单位

依据设计任务书或设计合同的规定，或由建设单位文件来确定建设期限和施工单位。

（四）设备材料清册

（1）列出线路本体部分主要设备及材料表，主要包括导线、地线、金具、绝缘子、间隔棒、防震锤、钢材、水泥、木材等设备及材料。说明各项目的名称、规格、数量及损耗标准等。

（2）列出通信保护部分主要设备及材料表，主要包括放电管、隔电子、排流线圈和其他保护措施的设备材料等。说明各项设备及材料的名称、规格、数量及损耗标准等。

（3）列出维护工器具和备品、备件等主要设备及材料，说明各项设备及材料的名称、规格、数量等。

三、施工组织设计大纲

一般线路施工组织设计大纲可作为说明书的一个章节，对投资影响较大的施工方案（如交通困难地段临时施工道路、索道、索桥修筑等）应单独编制施工组织设计大纲。大跨越应单独编制施工组织设计大纲。

施工组织大纲应包括以下内容。

（一）技术组织措施

（1）工程概况。主要包括线路的电压等级、回路数、起讫点、长度、导线和地线型式、各类主要杆塔和基础的型式及数量等。

（2）建设单位及期限。说明负责组织工程的建设单位、施工单位和开工、竣工期限。

（3）路径情况。主要说明全线路各类地形、地貌情况，全线各种交叉跨越物的数量及次数，影响线路建设需拆迁的房屋、设施及其他建筑物的数量和范围等。

（4）通信设施。说明在施工中的工程指挥系统及通信联络方式。

（5）施工组织措施。按照上级要求及建设单位的意见，并考虑线路自然情况及施工单位的力量情况，确定施工组织措施；说明施工单位可投入的技术力量，以及采用机械化、半机械化施工及人力施工的情况；说明利用最佳季节安排施工，以及在全面保证工程质量前提下完成任务的措施。

（6）主要设备材料表。除按本节二设备材料清册内容列表外，还应列出可供使用的大型机械设备表。

（7）对工程中的特殊施工要求，如停电过渡方案，新旧线换接方案，以及双回路、多回路的架线施工方案等，均应按设计要求予以说明。

（二）沿线交通条件及工地运输

（1）沿线交通条件。说明沿输电线路可供各种车辆通行的道路、桥梁与线路路径的相对距离及需要修桥、补路的情况。

（2）选择配料站和计算平均运距。按照方便施工和减少运距的原则，选择沿线配料站，并以各配料站为中心向各施工的杆塔位置配送材料；划分出各配料站供应的线段长度，并计算出全线路各种运输方式的运输工作量和平均运距。

（三）施工综合进度

（1）编制施工综合进度。按照对施工工期的要求，建设单位的意见，施工单位人力，机械设备及材料供应，各工序工作量和施工的有利季节等情况来制定各项施工进度。

（2）施工进度表。按施工工作量、各项目的施工工期以及投入人力和使用各类机械设备等情况，编制从施工准备至竣工的施工进度表，做到合理安排工期，促进优质、高效地完成施工任务。

大跨越施工组织设计大纲应包括大跨越规模，施工或永久电源、水源、通信设施配置，张牵场设置，施工及运行道路修筑情况，以及导、地线架设，附件安装，工程定额，工期测算，跨江放线封航措施等。

四、概算书

初步设计概算书应包括以下内容。

（一）编制说明

（1）工程概况。应包括线路起讫点，路径长度，回路数，电压等级，沿线路地形、地貌、地质、水文情况，气象条件，交通运输情况，导线、地线型式及根数，杆塔和基础的型式及数量，绝缘子串和金具的型式及数量，树木砍伐，障碍物拆迁，大跨越设计及有关特殊情况等。

（2）工程投资及概算指标。说明工程概算的总投资和平均每千米综合造价，以及本体工程的总投资和平均每千米本体造价。

（3）编制依据包括：

1）设计任务书或设计合同；

2）初步设计书及可研审核意见；

3）有关各项概算、预算的规定；

4）有关单位提供的概算资料，以及生产厂家提供工程使用的产品价格等；

5）市场价格计算价差的情况。

（4）技术经济分析。要分析工程的特点和各项工程设备材料消耗量多少的主要原因，并和同类工程每千米综合造价，本体造价及工程分项造价情况进行比较，分析造价高低的原因；进行估算、概算的技术、经济指标的对比分析，说明造价指标是否合理及存在的问题，提出解决的办法。

（5）建设单位及其他说明。在编制概算中要说明负责工程建设的单位及施工单位，以及其他该说明的问题及事项。

（二）概算表及附表、附件

初步设计概算的表格形式应执行《电网工程建设预算编制与计算标准》现行文件的规定。

概算表包括：主要技术经济指标（表五丙）、架空输电工程总概算表（表一乙）、架空输电线路安装工程费用汇总概算表（表二乙）、架空线路单位工程概算表（表三丙）、输电线路辅助设施工程概算表（表三戊）、其他费用计算表（表四）、建设场地征用及清理费用计算表（表七）。

附表包括：综合地形增加系数计算表（附表一）、输电线路工程装置性材料统计表（附表二）、输电工程土石方量计算表（附表三）、输电工程工地运输重量计算表（附表四）、输电工程工地运输工程量计算表（附表五）、输电工程杆塔分类一览表（附表六）。

上述概算表和附表部分详见本系列手册《技术经济》分册附录 B。

初步设计概算附件包括：建设期贷款利息计算表、编制年价差计算表、勘测设计费计算表、可行性研究与概算投资对比表以及特殊项目依据性文件等。

输电线路初步设计的计算项目及其深度要求见 DL/T 5451—2012《架空输电线路工程初步设计内容深度规定》。

工程勘测报告，包括测量工程报告、岩土工程报告、水文气象报告，其内容见本系列手册的《工程测绘》《岩土工程勘测设计》和《工程水文气象》分册。

第三节 施工图设计

施工图设计是按照国家的有关法规、标准、初步设计原则和设计审核意见所做的安装设计，由施工图

纸和施工说明书、计算书、地面标桩等组成。施工说明书主要是说明为实现设计意图而要求的施工方法、原则和工艺标准。

工程施工图设计文件编制，必须符合国家有关法律法规、现行工程建设标准规范及电力行业技术标准，其中涉及强制性条文的规定必须严格执行，还应积极采用现行的通用设计和标准化设计。

根据 DL/T 5463—2012《110kV～750kV 架空输电线路施工图设计内容深度规定》，施工图设计文件的主要内容有：卷册总目录、图纸目录、施工图总说明书及附图、各专业设计图纸和说明、设备材料表、有关的勘测报告及附件、合同要求的工程预算书、各专业计算书等。计算书不属于必须交付的设计文件，但应按照有关规定的要求编制并归档保存。

施工图设计内容深度应满足以下基本要求：设计文件齐全，计算准确，文字说明清楚，图纸清晰、正确，各级签署齐全。图纸目录图号编序通常宜先列新绘制图纸（说明书），后列选用的标准图纸和套用图纸。设计文件应满足设备材料采购和施工的需要。对于多个设计单位参加的项目，提供的设计文件相互关联处的深度应当满足施工图设计深度要求。对于设计段内有多个分段施工的项目，提供的设计文件相互关联处的深度应满足分段施工的要求。

施工图设计内容及深度应满足如下详细要求。

一、施工图总说明书及附图

施工图总说明书前面应附本工程卷册总目录、本册图纸目录及附件目录等。

（一）总述

（1）工程概况。简要说明本工程名称、起讫点、线路长度、海拔、冰风区、通过行政区、地形、地貌等工程情况及各阶段勘测设计完成情况。

（2）设计依据。主要包括：项目立项批文、初步设计评审意见及建设单位的合同要求；执行的主要技术文件、标准、规程及规范；科研试验报告及咨询意见，包括科研试验报告、咨询报告及评审意见的名称、编号、主要结论及应用情况；有关的协议文件。

（3）设计规模和范围。设计规模及范围主要包括从某一变电站至另一变电站的全部或部分线路本体设计，通信保护设计，预算编制（如合同有要求），及运行组织设计的附属设施等。

（4）初步设计评审意见的执行情况。说明执行初步设计的情况，对初步设计修改及评审意见执行的情况。在施工图设计中，因某些原因不能执行初步设计和评审意见时，重大问题应有报告并说明处理结果，一般问题要说明变化的理由和结论意见。

（5）强制性条文执行情况。

（6）必要时应列出建设、设计、监理、施工及运行单位名称。

（7）主要技术经济指标。

1）主要技术特性。分项说明线路名称、起讫点、电压等级、回路数、导地线型号、线路长度、曲折系数、海拔、输送容量、中性点接地方式、沿线地形地貌、气象区划分、污区划分、杆塔和基础型式、导地线换位及主要交叉跨越情况等。应列表说明杆塔和基础形式及数量。

2）主要经济指标。列表说明各冰区、风区和全线的线路长度、平均档距、平均耐张段长度、每千米杆塔数量；列出导线、地线、杆塔钢材、基础钢材、挂线金具、接地钢材、间隔棒、防振锤、绝缘子、混凝土、土石方等材料的单位千米指标；列出房屋拆迁及树木砍伐指标。必要时列出线路本体、静态和动态投资。

（二）两端变电站出线及线路路径

（1）两端变电站出线。说明线路从变电站第几间隔出线，进入变电站第几间隔。

（2）线路路径。说明线路起讫点及走向，经过地区的市、县名称及线路长度、曲折系数及线路路径情况；列表说明线路跨越铁路、公路、河流、电力线（分电压等级统计）、通信广播线、重要管道、林场等障碍物的次数或长度；列出障碍物的拆迁量（如采石场封闭、炸药库搬迁、电力线、通信设施和道路改迁等）；标明沿线的地形、地貌、地质、植被、地震烈度、厂矿设施、自然保护区、城镇规划、水文气象情况及海拔范围；说明沿线有无不良地质地带、压覆矿情况、线路施工运行条件、铁路、公路交通情况等。改接、T接、π 接等应说明线路的工程改造、过渡方案的情况及注意事项；说明新形成线路的运行总长度。

（3）路径协议。说明复核和补充路径协议的情况。必要时路径协议应取得乡镇级的同意文件。

（三）设计气象条件

说明最高气温、最低气温、基本风速、覆冰、安装、平均气温、雷电过电压、操作过电压、验算冰风（如有）等组合的气温、风速和冰厚的设计取值情况；说明年平均雷暴日数、冰密度及风压系数的设计取值情况，以及气象区划分情况。设计气象条件可按表 1-3 的形式列表说明。

（四）导线和地线

说明导线和地线（含 OPGW）的型号和规格、设计安全系数、最大使用应力、平均运行应力；导线分裂根数、分裂间距及排列方式；说明导线地线悬挂点应力放松情况及导地线蠕变伸长的处理方法等。列出导线和地线（含 OPGW）机械物理特性表；说明交直流特高压线路耐张绝缘子串对导线架线弧垂的影响和

处理措施。

（五）绝缘配合

说明全线污区划分、爬电比距取值、绝缘子主要尺寸、机电特性和绝缘子片数；说明直线和耐张导线绝缘子串在不同的海拔、塔高、污区、冰区时，各型绝缘子的片（支）数及实际爬电比距；说明工频电压、操作过电压、雷电过电压及带电检修时在不同海拔的最小塔头空气间隙和相应的设计风速。

（六）防雷和接地

应简述本工程的防雷措施；说明地线架设根数、地线对边导线的保护角、不同土壤电阻率下允许的工频接地电阻值、接地装置型式、对高土壤电阻率地段及有土壤腐蚀地段应采取的降阻、防腐措施等；说明对防雷措施和接地装置有特殊要求的塔号及具体要求。

（七）导地线防护措施

说明导地线防微风振动和导线防次档距振荡的措施，防振锤、阻尼线、间隔棒的型号、安装距离及安装方法等。线路经过易舞动地区时应说明采取或预留的防舞动措施。

（八）导线和地线换位（相）

说明线路换位（相）方式、换位次数和长度等情况，以及地线换位及接地、分段绝缘的情况。统一规定分段绝缘的要求及绝缘间隙取值。

（九）绝缘子和金具

说明导、地线绝缘子金具串在各种工况下的安全系数。列表说明各串型联数、绝缘子强度、挂点型式及适用条件。说明选择的主要标准金具型号和非标准金具使用情况。

（十）通信保护

说明对邻近的电信线路及无线电设施的危险和干扰影响情况，以及采取的保护措施。

（十一）杆塔

（1）应列表（一般见表 1-4）说明采用的主要杆塔型式及杆塔的使用条件。

表 1-4　　杆塔使用条件表

序号	杆塔型式名称	使用条件				杆塔计算高度（m）	呼称高范围（m）	备注
		水平档距（m）	垂直档距（m）	代表档距（m）	转角度数（°）			

允许开断 OPGW 的直线塔型应在表 1-4 中说明。

（2）杆塔结构设计说明。说明杆塔结构的主要特点，杆塔设计时采用的特殊结构，以及长短腿塔型最小和最大的接腿级差。

（3）杆塔防松防卸措施。

（4）杆塔登塔措施。

（5）杆塔防腐措施。

（6）杆塔材料要求。说明杆塔采用的材料型式（角钢、钢管或其他材料），杆塔用钢材材质规范，以及连接螺栓的材质规范。

（7）杆塔防坠落装置要求。

（8）杆塔加工及施工要求。说明执行的杆塔施工验收规范；提出杆塔加工、焊接的要求，以及采用的螺栓标准及要求；说明立塔架线的限制条件和其他的杆塔施工要求等。

（十二）基础

（1）地形和地质概况。简要概述沿线地形、地貌及交通情况，沿线塔基地质条件，地下水情况（包括对基础的影响、腐蚀性）及沿线地震设防烈度等。

（2）基础设计说明。说明各种基础形式的特点及适用范围、代号和其他必要的设计说明。

（3）杆塔与基础的连接。说明基础采用的底脚螺栓、插入角钢、偏心设置等连接方式。

（4）基础材料要求。说明插入角钢及底脚螺栓的材料规范，基础用钢材的材料规范，以及基础用混凝土强度等级及遵循的规范等。

（5）基础加工及施工要求。说明塔基复测要求，基坑开挖及回填要求，基础根开校验的要求，不对称杆塔、转角杆塔、终端塔的基础分坑及顶面的预偏要求，边坡保护要求，弃土堆放原则，塔位的排水处理要求，特殊基础形式的施工要求，以及其他必要的说明。

（十三）对地距离及交叉跨越

说明对地及交叉跨越距离，线路电磁场环境限值标准，房屋拆迁原则，及通过林区高跨和砍伐的原则。

（十四）附属设施

说明运行维护巡视站的建筑面积，杆塔上的固定标志、运行及管理交通工具，设备配置及备品备件，以及线路运行维护的通信设施。

（十五）环境保护

说明执行国家环境保护、水土保持和生态环境等相关法律、法规和本工程环评、水土保持、压覆矿、地质灾害、地震灾害、文物等评估报告的情况及采取的保护环境措施。

（十六）劳动安全和工业卫生

根据国家规定的有关防火、防爆、防尘、防毒及劳动安全与卫生等规定，结合工程实际情况，提出防火、防爆、防尘、防毒、防坠落、防电磁感应电压等安全措施及注意事项。

（十七）施工、运行注意事项

根据施工、运行有关规程、规范、导则的规定，

结合工程实际，分电气和结构专业分别提出施工、运行的注意事项。

（十八）主要设备材料汇总表

（1）主要设备材料表。提出全线路的导线、地线、绝缘子、金具、钢材、水泥、木材、房屋拆迁、汽车等设备材料的总数量和每公里的数量表。

（2）通信保护主要设备材料表。提出放电管、隔电子、排流线圈和其他保护设备材料的数量。

（十九）设计说明书及卷册目录

列出全部初步设计和施工图设计的说明书及卷册目录。

（二十）附图

（1）线路路径图。一般宜采用 1∶5 万比例地形图，图中应标出两端变电站的实际平面位置，以及与线路走向、路径协议有关的规划区、厂矿设施、自然保护区及新修公路等。图中尚应标出与本线路平行或交叉的主要高压输电线路、地下管线等的路径、名称等。输电线路应标出电压等级。若存在多个气象区，则图中应标出冰区、风区划分情况。图中还应标出转角位置、转角顺序编号及塔位号。线路穿越城市规划区，且当城建部门有要求时，应列表给出线路转角和塔位的坐标。图中尚应标出指北针和图例。

（2）变电站进出线平面图。变电站平面布置图应标注本线路所占间隔、终端塔位置、线路转角、相序、指北针、进出线与变电站构架及相邻进出线的关系等。

（3）杆塔形式一览图。列出全线使用杆塔的单线图，并注明杆塔的名称、尺寸及特征数据、钢材耗量等。

（4）基础形式一览图。列出全线使用的主要基础形式图，并注明每种基础形式的名称、主要尺寸范围，并列表给出基础材料的主要指标。

（5）线路走廊拥挤地带的平面图（必要时提供）。图上应注明线路路径及塔位、塔号、塔型、线路两侧的规划区、自然保护区、厂矿设施、建筑物等的位置（坐标）及名称。图纸比例可根据实际情况确定。

（6）特殊图纸（必要时提供）。可根据工程实际情况提供需要的图纸（如路径协议附图等），图纸内容应能明确表达设计意图。

（二十一）附件

包括上级和其他单位的重要文件、初步设计评审意见、重要的会议纪要、路径协议文件等。

二、线路平断面定位图及杆塔明细表

（一）平断面定位图

线路断面图及平面图是测量专业的测量成果，是按设计人员选出的线路路径方案，由测量专业绘出供设计用的断面图及平面图。设计人员在此基础上进行定位优化，形成包括沿线断面地形，杆塔位置及各项地面物的标高、里程、杆塔编号和杆塔型式、弧垂线等的断面定位图和包括各种杆塔档距、里程、标高、耐张段长度、代表档距等的平面图，构成平断面定位图。平断面定位图的详细要求说明如下：

（1）平断面定位图表达的设计内容包括：逐档画出最大弧垂的地面线。对铁路、高速公路、通航河流（2 级及以上）等重要跨越，还应画实际悬点高的最大弧垂线，标注塔号、塔型、定位高差（或施工基面）、塔位高程、杆塔位置、档距、耐张段长度及代表档距，以及风偏断面图。如需开方，应注明开方范围及所开土石方量，并应说明改迁的电力线、弱电线、公路等。图中尚应注明耐张绝缘子串需倒挂的塔位。注明跨越协议有关的铁路、高速公路等重要跨越处的里程、交叉角及杆塔号等。气象分区处，平断面定位图宜在塔位上分幅。

（2）平断面定位图设计的计算要求：采用计算机软件排位时，所采用的软件必须经过有效鉴定；应在测量专业提供的平断面图上，按照初步设计审定的气象条件、导地线型号、杆塔使用条件、对地及交叉跨越距离等设计原则进行优化排位；应计算对地及交叉跨越距离和开方量，并落实对电力线、弱电线及公路等的改迁范围。

（二）杆塔位明细表

1. 卷册说明

（1）工程概况。内容应包括线路起讫点、路径长度、回路数、设计气象条件、导地线使用情况、OPGW 悬挂侧、地形划分、污区划分，以及标段划分情况等。

（2）给出线路前进方向及基础 A、B、C、D 腿的布置。

（3）说明塔位高程所属高程系统及定位高差（或施工基面）的具体含义，约定塔位中心桩位移的表示方法等。

（4）标明导地线绝缘子金具串代号对应的图号。

（5）说明导地线悬点放松、导线耐张绝缘子串倒挂及导地线弧垂误差控制情况。

（6）说明地线运行方式，包括地线换位及接地，分段绝缘情况，统一分段绝缘的要求等。

（7）列表说明主要交叉跨越次数及处理情况，以及导线、跳线对地距离和风偏开土石方量等。

（8）列出使用的塔型和数量表，以及其他必要的说明。

2. 杆塔位明细表

杆塔位明细表应包括基本风速与设计覆冰厚度；序号、塔号、塔位点、塔型、塔的呼称高、塔位桩顶高程及定位高差（或施工基面）。档距、水平档距、垂直档距、耐张段长、代表档距、转角度数及中心桩位

移；接地装置代号、导线绝缘子串（代号、联数及片数、串数）、地线绝缘子串（代号、串数）、绝缘子串倒挂、导地线防振锤、间隔棒、重锤、防舞装置、交叉跨越及处理情况等。

3. 杆塔位明细表的计算内容及要求

所采用的计算机软件必须经过有效鉴定；按照初步设计原则编制定位手册及定位校核曲线（表）。定位校核曲线（表）计算应包括杆塔使用条件、K 值、导地线悬点应力、直线及小转角塔绝缘子串摇摆角、绝缘子金具串强度、耐张绝缘子串倒挂、悬垂角、导地线上拔及地面电场强度分布，以及超杆塔设计使用条件的验算负荷等。

（三）交叉跨越分图

交叉跨越分图是供有关单位掌握线路跨越铁路、高速公路和Ⅰ、Ⅱ级通信线路的情况及签订施工协议使用，图中应标明与被交叉跨越物距离的各项尺寸。

三、机电施工图及说明书

（一）架线施工图及说明书

（1）卷册说明。说明线路的起讫点、长度、回路数、设计气象条件。列表说明导地线型号、安全系数、适用区段等。

（2）导、地线特性曲线（表）包括张（应）力特性曲线（表）及弧垂特性曲线（表）两部分。

导、地线特性曲线应绘制最低气温、平均气温、基本风速、覆冰、最高气温、安装、雷电过电压（有风）、雷电过电压（无风）、操作过电压等工况的力学特性曲线（表），还包括导线的最大弧垂（覆冰或高温弧垂较大者）、雷电过电压（无风）的弧垂特性曲线图（表），以及地线的雷电过电压（无风）弧垂特性曲线图（表）。导、地线特性曲线图（表）上标明临界档距、物理特性表与单位比载表。物理特性表应包括导地线型号、截面积、计算外径、弹性系数、线膨胀系数、计算拉断力、安全系数、最大使用张力与平均运行张力。单位比载表应包括自重、冰重、风荷重及综合荷重等，图中尚应标明气象参数。非标导、地线参数应采用中标厂家提供的准确参数。应分别计算工程涉及的各气象区导地线特性，同一气象区下不同安全系数的导、地线特性等。

（3）导、地线架线曲线图（表）。可绘制不同代表档距下的架线弧垂曲线（表）或百米架线弧垂的曲线（表），应绘制从安装气温（考虑降温）到最高气温，每隔 5～10℃的架线弧垂，并应在图纸上标明降温度数及观测档弧垂换算公式。非标导、地线参数应采用中标厂家提供的准确参数，分别计算工程涉及的各气象区导、地线架线曲线图（表）。同一气象区不同安全系数的导地线架线曲线图（表），应分别计算不同温度，不同代表档距下的弧垂和张力。国标导地线应按设计技术规程规定降温后进行计算，非标导、地线应根据厂家提供的蠕变特性数据来确定降温度数，交直流特高压工程应给出耐张绝缘子串对导线架线弧垂的影响及处理措施。

（4）孤立档架线表。标明架线及竣工验收弧垂，还应在架线表上表明允许的过牵引长度及考虑初伸长降温情况，分别计算架线及竣工验收弧垂。孤立档的弧垂应力计算应考虑过牵引，过牵引长度按照相关规定考虑。进出变电站档放线弧垂计算时，应考虑导线上集中荷载对弧垂的影响。

（5）连续倾斜档线夹安装位置调整表。在可能的架线温度范围内，宜每隔 5～10℃绘制一组观测弧垂值和悬垂线夹安装位置调整值，给出耐张段内各杆塔号、代表档距、架线气温，以及各档档距及相应的观测弧垂值、每基直线杆塔上悬垂线夹安装位置调整值，并画图示意调整值正负号所代表的偏移方向。在图上应标明："当施工放紧线段与实际耐张段不一致时，施工单位应重新计算连续倾斜档线夹安装位置调整表，并根据计算结果进行调整。"调整表尚应标明降温度数，且在调整值计算中采用的应力应考虑塑性伸长的影响（即采用降温后的应力）。

（二）换位（换相）图

（1）导线换位示意图。绘制相序平面示意图与相序在杆塔上变换的立体透视图；给出各相导线的连接方式和相序，以及两端变电站进出线的相序排列，注明换位段长度及各换位杆塔号和塔型。导线换位或换相时需要校验导线相间接近距离是否满足要求。

（2）地线分段绝缘安装示意图。图中应标出每根地线分段绝缘的长度要求，并根据不同的耐张段长度标出绝缘和接地点的位置。

（3）换位塔导线布置图。线路换位塔导线布置图一般采用立体透视图的形式反映出各项导线在换位塔上换位的具体走向和连接方式，图中应标明各处的相序和换位塔的塔号、塔型、换位段长度及塔两侧的来去方向。如果采用辅助塔换位，应标明辅助塔的位置及辅助塔之间的导线架线表。提出必要的施工要求及说明。

（三）跳线安装图

（1）耐张塔跳线安装示意图。须用三维或两个不同视图表现不同侧跳线的安装布置方式，图中应注明不同位置的电气间隙要求，并画图示意，注明跳线串安装偏角要求，以及注意事项等安装说明。

（2）跳线安装表。应逐基进行耐张塔跳线计算，注明杆塔号、杆（塔）型、转角度数、跳线施工弧垂、跳线的参考线长及其允许施工误差（如三相或各子导线不同，则应分别给出）。如需要加跳线绝缘子串，则

应在表中注明杆塔号及相别。表上应用图示意施工弧垂和跳线对杆塔横担或对绝缘子串上接地最近点的间隙要求。画出简图，示意各种跳线方式中跳线间隔棒的安装方法，包括安装尺寸及安装数量。对于刚性跳线应列表给出施工弧垂、参考线长、钢（铝）管长度、配重、斜拉杆长度等。列出跳线施工工艺要求（如跳线外形美观的要求）。

（3）刚性跳线组装图。根据需要绘制不同相别的刚性跳线组装图，图中应标明钢（铝）管长度，钢（铝）管与跳线绝缘子串、爬梯的连接方式及位置，配重安装数量及位置，以及材料表等。

（四）接地装置图

接地装置配置应根据不同地形、不同土壤电阻率来确定，并根据塔位周边设施确定敷设方式。宜逐基测量土壤电阻率。标明每种接地装置的各部尺寸、埋深要求、材料规格、数量及土方量，并注明适用的土壤电阻率范围和验收时的工频电阻要求值，以及每种接地装置适用的塔型与地区。应说明施工时对接地体敷设、焊接、防锈及接地电阻测量的方法（含季节系数）和允许施工变动的内容与范围，施工工艺上的注意事项和具体要求等。如利用杆塔的自然接地时，应注明适用的杆（塔）号、杆（塔）型，并应注明验收时的工频电阻要求值，如达不到要求值，则应补加人工接地。采用降阻剂、接地模块、导电防腐剂或其他降阻防腐措施时，应标明使用地段、技术要求和施工安装方法。

（五）导地线防护措施

（1）导地线防振。给出防振锤型号及安装原则，用图示意直线杆塔和耐张杆塔上各防振锤的安装距离（从线夹出口算起）。采用特殊型式的防振锤时，应说明防振锤的优越性及安装方法。阻尼线安装图须标出阻尼线型号、阻尼线花边的布置、阻尼线花边弧垂，以及防振锤安装位置和安装说明。采用其他防振方案时，应有相应的安装图及说明。应提供设备材料表。

（2）间隔棒安装。说明相关安装要求，含不对称安装、最大平均次档距限值、端次档距限值、特殊地段的最大平均次档距限值、安装误差标准、间隔棒型式等；根据不同的档距范围给出间隔棒安装距离表及一档中每相安装导线间隔棒的数量。

（3）防舞装置安装。说明安装（或预留）防舞装置的原则、型号及方法。提出防舞装置安装图（表）及设备材料表。

（六）绝缘子串及金具组装图

（1）绝缘子串及金具组装图图纸。提出不同导线绝缘子串及地线金具串的型式，包括不同的绝缘子串型式、吨位、联数、挂点数和长度，以及导线悬垂 I 串、V 串、L 串、下垂式及上扛式等。也包括各种跳线串，导线正、倒挂耐张串及进出线档耐张串，不同型式的地线金具串，必要的非标金具元件加工图，耐张串长度调整表，加工及安装说明等。

（2）设计内容及深度。给出绝缘子金具串的正视图，多联绝缘子串还应有其他方向视图，多分裂导线耐张串应给出引流板安装示意图，标明各子导线金具连接顺序。注明各元件主要连接尺寸及总尺寸，包括各串型元件名称、型号、图号、数量、单位质量，并给出绝缘子串或金具串的总质量及材料表。注明允许荷重及控制元件。带绝缘子的地线金具串，应标明绝缘间隙的安装方向，说明安装工艺上的注意事项和特殊要求。必要时，应提供非标金具元件（主要指联结金具）加工图，图中应有金具加工的细部尺寸，并标明金具的材质、强度、质量及必要的加工要求和说明。提供导线耐张串长度调整表，表中分别列出耐张转角塔的塔型、转角度数、绝缘子串补偿长度，标明补偿采用的金具名称型号，还应给出简图并说明图中符号的意义、施工注意事项和技术要求等。

四、杆塔施工图及说明书

1. 杆塔技术条件

根据初步设计塔型规划情况进一步明确各类杆塔技术条件包括塔头尺寸、地线支架高度、线间距离、电气间隙圆图和地线保护角等。标明呼称高分级，导地线挂线高度及挂线方式，杆塔荷载条件，转角塔的转角度数，横担设置及跳线方式，长短腿级差及最大级差，杆塔登高设施（脚钉、爬梯及简易休息平台），新技术的采用和推广要求，新结构的设计计算原则和方法，以及套用典型设计和重复利用工程图纸的要求等。

2. 杆塔计算书

各种荷载工况下杆塔都应满足强度、稳定、刚度的要求。采用人工计算的结构计算书，应给出计算简图及荷载取值的计算或说明，内容应完整、清楚，计算步骤要条理分明，引用数据有可靠依据，采用计算图表及不常用的计算公式，应注明其出处。采用计算机程序计算时，应在计算书中注明所采用的计算程序名称、代号、版本及编制单位。计算程序必须经过有效鉴定，输入信息和输出结果应整理成册。套用杆塔应满足电气间隙和各种荷载作用下的杆塔的强度、稳定和刚度要求，应掌握套用杆塔的原始设计条件，并按现行规程、规定进行全面校核验算。校核计算内容应作为结构计算书的一部分。

3. 杆塔设计图纸

（1）杆塔设计图纸一般要求。杆塔制图应遵守设计及制图规定中有关构造规定的要求。杆塔图宜采用 1 号或小于 1 号的图幅，同册图纸宜以一种规格的图幅为主，避免大小图幅混杂使用。在设计图纸中，所

有涉及数量的数字，应采用阿拉伯数字，计量单位应符合《中华人民共和国法定计量单位》的规定。图纸上标注的尺寸，应以 mm 为单位；采用特殊钢种的部件，应醒目标示所用钢种的代号。总图、导地线挂线点和塔腿接地孔等与电气专业配合的图纸，需由电气专业会签。根据施工和检修时设备安装及固定标志牌的需要，在杆塔上预留安装孔。

（2）钢筋混凝土电杆。组装图要求画出立面图及标注尺寸，如有拉线，还需绘制俯视图；组装图应包括节点安装大样图，并标注出部件的编号，还应列出完整的组装部件材料表。杆段加工图应绘出纵剖面图，横断面图，脚钉位置图。钢管、脚钉螺母、接地螺母、排水管、横担、吊杆、抱箍、穿钉等钢件加工图应绘制详图，并对焊缝做出明确规定。提出高低杆段配置表。

（3）铁塔图纸。总图要求绘制铁塔立面单线图，标明段号、说明及主要尺寸，并列出材料汇总表。铁塔分段结构图应绘出单线图，正、侧、顶、底面展开图，隔面俯视图，复杂节点详图，接头展开图及剖面图，并附有尺寸标注、材料表及说明。

4. 杆塔设计和加工说明

每一种（类）杆（塔）型应编写一份结构设计说明，或对一个工程所涉及的杆塔设计编写一份统一的结构设计和加工说明。说明应包括但不限于以下内容：杆塔加工的方法和应遵守的规程、规范及规定的名称编号；构件材料，说明钢材牌号和质量等级及所对应的产品标准，以及其他特殊要求。角钢构件应有角钢准距表和边距、端距的要求。焊接应包括各种钢材的焊接方法及所采用焊接的要求。螺栓应注明螺栓种类、性能等级及螺栓规格表，列出构件及螺栓防腐措施及其他加工要求等。

5. 杆塔施工说明

列出所执行的技术规程、规范、规定的名称及特殊问题的要求；强调指出各类杆塔在加工、施工中应当特别注意的要点及使用条件；说明锚线杆塔及操作杆塔的使用条件。提出悬垂转角塔、转角塔及终端塔的预偏方向和预偏值。采用新型杆塔时应说明其特点和注意事项。对 Q460、Q420 等高强度钢材的尺寸偏差、强度、化学成分、冲击功、碳当量、制孔、截断、焊接、火曲等做出的特别规定以及其他的要求和说明。

五、基础施工图及说明书

1. 基础配置表（明细表）

应包含地质条件、杆塔编号、杆塔型号、呼高、接腿配置、基础柱顶高程及塔位中心桩高程、基础型号、基础图号、基础防护措施、处理方案等内容。编制一塔一图的工程可不再编制基础配置表。500kV 及以上山区线路宜编制一塔一图。编制一塔一图时，图中应给出塔位的地形、塔基断面、接腿布置、地层岩土特性以及杆塔编号、杆塔塔型及呼高、接腿配置、基础根开、基础规格、基础防护措施、基础与杆塔的连接参数等内容。

2. 基础施工说明

每个单项工程应编制基础施工说明，可独立成图也可与基础配置表合并编写。施工说明应包括以下内容：说明基础施工图设计与初步设计有何不同，以及对初步设计有何补充。说明基础施工时应遵守的有关规定及要求，本工程基础形式种类、采用新技术的基础形式特点、要求，以及基础的特殊要求及注意事项。施工说明尚应对基坑开挖、边坡及植被保护、边坡及植被恢复、弃土弃渣处理、基坑降水、基坑回填及夯实等做出要求。对基础材料，桩基础的质量检测方法及静载试验方案做出规定。涉及特殊施工工艺的基础形式应与施工单位配合编写施工组织方案。

3. 基础根开表

应列出全线杆塔根开、基础根开、地脚螺栓根开和规格等基础安装数据。

4. 基础施工图

（1）预制基础。应包括平、立、剖面及配筋图，外形尺寸及铁件制造图，埋置深度，材料表和必要的施工说明。

（2）普通现浇基础。应包括基础布置图，基础平、立、剖面图，配筋详图，外形尺寸，埋置深度，底脚螺栓或插入角钢定位尺寸，材料表和必要的施工说明。

（3）桩基础。应包括基础平面布置图，基础平、立、剖面图，配筋详图，承台详图及桩与承台的连接构造详图，外形尺寸，埋置深度，底脚螺栓或插入角钢定位尺寸，锚固件加工图，材料表，以及必要的施工说明。

（4）特殊基础可参照普通现浇基础施工图的内容编制。

（5）护坡、排水沟等防护设施施工图可包括平、立、剖面图，配筋图，外形尺寸，埋置深度，材料表和必要的施工说明等。

5. 基础计算书

应注明采用的规程、规范和规定。采用的计算软件应注明软件名称及版本号。人工计算的计算书应注明所采用主要计算公式的出处。应有水文、地质资料报告的分析结果。计算基础作用力时，应注意风压调整系数的取值与计算杆塔时不同。计算内容应包括上拔稳定计算，基础下压地基承载力计算，倾覆稳定计算，基础强度计算，地脚螺栓、插入角钢计算等。特殊的基础形式计算还应满足相应的规程、规范要求。当选用典型设计和重复利用基础图纸时，应结合工程地质情况进行复核验算。

六、通信保护施工图及说明书

1. 设计文件内容

设计文件应包括设计说明、图纸及相关计算书。

2. 通信保护设计说明

简要说明架空输电线路系统情况，以及与电信线路和无线电设施接近情况及结论。说明设计原则及依据，包括设计（计算方法、允许标准）所依据的规程规定、通信部门提供的相关参数、单相接地短路电流曲线、大地电导率数值、架空输电线路与电信线路及无线电设施相对位置图的来源。说明对初步设计审查意见的执行情况及补充初步设计未提及的问题，列出受影响电信线路、无线电设施（包括导航台、雷达、差转台等）的计算结果，提出相应的保护措施。按需保护的通信设施列出设备材料表，并应说明改迁通信设施情况，以及通信保护相关协议。

3. 通信保护设计图纸

（1）图纸。提出输电线路与电信线路、无线电设施相对位置及放电器配置图，单相接地短路电流曲线，放电器安装图，接地装置图，以及其他保护装置安装图（根据工程实际需要）。

（2）设计深度。输电线路与电信线路、无线电设施相对位置及放电器配置图应标示：输电线路路径位置及主要村镇位置，电信线路路径位置、起讫点、所属单位、架设方式、明线与电缆接续点及无线电设施位置；影响计算的分段编号及长度、接近距离、接近段到电力线两端电源的距离；大地电导率分段值。如需安装放电器时，应在相对位置图的电信线路上标出安装放电器的位置，并进行编号。在图上列表标明电信线的架设方式，电信线的线质、线径及线数，安装放电器的位置、个数及编号，接地电阻要求值和接地装置型式等。

单相接地短路电流曲线应绘制故障线路短路电流曲线及有关非故障线路的短路电流曲线。

放电器安装图应标明放电器安装的材料、型号规格、数量、尺寸及安装方法等。

接地装置图应标明各种型式接地装置的接地电阻、各部尺寸、埋深、材料规格与数量、土石方量、安装工艺上的注意事项与具体要求。

其他保护装置应根据工程实际需要绘制安装图。

4. 通信保护设计计算

通信保护设计计算应包括互感系数计算、纵电动势计算、终端效应计算、对地电压计算，以及放电器配置及干扰影响计算等。

七、OPGW（ADSS）施工图

1. 设计说明

（1）说明设计依据及范围，内容包括：简要说明线路名称、线路长度、导地线型号、气象条件、沿线地形等工程概况；说明光缆架设位置；并应列表说明光缆设计气象条件、光纤参数、光缆型号、结构和参数，以及热稳定校核的结论等。

（2）说明地线、光缆接地或绝缘方式及换位情况；说明光缆安全系数、最大使用张力及其防振措施；提出 OPGW（ADSS，全介质自承式光缆，all dielectric self-supporting optical fiber cable）架线明细表，内容包括有关塔号、档距及光缆盘号、盘长、接头位置、接头处塔型、金具及防振装置配置等。

（3）对于 ADSS 光缆则需说明在杆塔上的悬挂点位置，以及对杆塔的影响和采取的相应措施。

（4）说明光缆施工过程中应注意的事项，并应说明金具串、引下线、接头盒、余缆架的安装位置及防振装置（如防振锤、防振鞭）的安装数量，以及 ADSS 光缆对交叉跨越的校核情况和处理措施。列出设备材料表。

2. 光缆设计图纸内容及深度要求

应提出光缆力学特性曲线、光缆架线曲线、孤立档架线表、分流地线及光缆换位示意图、悬垂/耐张金具串安装示意图、防振装置安装示意图、ADSS 杆塔上挂点示意图、接头盒安装示意图、余缆架安装示意图、接头盒结构示意图、余缆架结构示意图、引下线夹结构示意图、护线条结构示意图、OPGW（ADSS）光缆结构图及物理特性参数表、耐张塔引下线及跳线安装示意图，以及站内光缆引下示意图。

（1）光缆力学特性曲线（表）。应包括特性曲线（表）及弧垂特性曲线（表）两部分，具体内容有：绘制最低气温、平均气温、最大风速、覆冰、最高气温、安装、雷电过电压（有风）、雷电过电压（无风）、内过电压等工况的力学特性曲线（表）。绘制最大弧垂（覆冰或高温弧垂较大者）及雷电过电压（无风）的弧垂特性曲线（表）。当有验算气象条件时，应绘制验算条件的光缆力学特性曲线（表）。图上还应标明临界档距，物理特性表与单位比载表。物理特性表应包括截面积、计算外径、弹性系数、线膨胀系数、计算拉断力。单位比载表应包括自重、冰重、风荷重及综合荷重等。

（2）光缆架线曲线（表）。架线曲线（表）应绘制不同代表档距下的架线弧垂或百米架线弧垂。从安装气温（考虑降温）到最高气温，每隔 5～10℃的架线数据，绘（列）出一条架线曲线（表），图纸上尚应标明降温度数，观测档弧垂换算公式。

（3）孤立档架线表。应绘出施工架线及竣工验收弧垂。施工架线表上应说明允许的过牵引长度。

（4）分流地线及光缆换位示意图。图中应说明换位段长度、各换位杆塔号和塔型，以及分流地线和光缆换位方式示意图。

（5）悬垂、耐张线夹安装示意图。图上应标明各元件主要连接尺寸及总尺寸，以及内绞丝、外绞丝尺寸。图上所列材料表应包括各串型元件名称、型号、数量、材质、单位质量及金具串总质量，图上尚应注明线夹整串强度及线夹握力、适用光缆直径等。

（6）防振装置安装示意图。应用图示意直线塔和耐张塔上每个防振装置的安装位置，注明防振装置安装原则和安装要求。

（7）ADSS 光缆杆塔上挂点示意图。在图上应标明每种塔型上 ADSS 光缆的挂点位置。

（8）接头盒、余缆架安装示意图。应注明杆塔上接头盒、余缆架的安装方式及离地面的高度；应注明引下夹具的安装间距及引下位置，并应说明其他需要注意的事项。

（9）接头盒、余缆架、引下线夹、护线条及光缆的结构示意图。接头盒、余缆架、引下线夹、护线条、光缆等的结构图应用生产厂家提供的图纸，并在图上标明主要部件尺寸及具体型号的适用范围。护线条应注明单丝外径。光缆应标明结构及性能参数。

（10）计算书。应包括光缆力学特性曲线（表）、架线曲线（表）、金具强度、防振装置安装及 ADSS 光缆对交叉跨越距离的校验等的计算。

八、设备材料表

1. 设备材料内容

设备材料表应包括编制说明和材料用量表。

2. 编制说明

（1）简述工程名称、线路长度、回路数、电压等级、导地线型号、分裂导线及施工分标段情况等。

（2）列表说明导线、地线、绝缘子等的力学物理特性；说明金具是否为定型产品；新研制金具应说明技术条件。

（3）说明考虑耗损和备品备件的情况。

（4）宜分冰区按塔型、呼称高分别列出杆塔数量及总杆塔数量；宜按标段、冰区列出绝缘子串、金具的串型及数量。

（5）列出设备材料的特殊要求或说明。

3. 材料用量表

（1）电气部分材料表一般按导线、地线、绝缘子、金具、接地钢材等顺序分类统计，列出材料名称、型号、图号、实用量、损耗量、备品备件及总量等。

（2）结构部分材料包括杆塔部分材料和基础部分材料。杆塔部分材料按钢种、型号、规格统计，即按角钢、圆钢、槽钢、钢板、钢管、螺栓、防盗螺栓、扣紧螺母、脚钉、垫圈、拉线及拉线金具等材料分类统计。基础部分材料按角钢、螺栓、圆钢、钢板、钢管、铸铁、各标号混凝土等分类统计。按业主要求，设备材料也可分施工标段列出。

九、通道清理施工图及说明书

1. 房屋拆迁

（1）房屋拆迁说明。说明房屋拆迁的原则及拆迁面积的计算方法；列表说明不同建筑分类和材料类别的房屋拆迁量。

（2）房屋拆迁明细表。列表说明房屋分布平面图内有关房屋的详细情况，包括杆塔号、物权人姓名（或单位名称）、所在地、房屋所处位置离线路中心的距离和净空高度、房屋建材类别、房屋分类面积（含主房、辅房）、夹层情况、是否拆迁等。若有必要，应提供线路走廊内的房屋分布平面图和拆迁房屋的照片。

2. 其他障碍设施的拆迁

根据相关规范及路径协议要求清理的障碍应列出设施名称、所属单位、规模、数量等。宜列入塔位明细表说明中。

3. 树木砍伐

应说明沿线树木分布现状及跨树、砍树设计原则。列表说明需砍树档内（包括塔基、风偏等砍树）的主要树种、林地性质及净空距离等。必要时应绘制砍树平面图。

十、工程地质报告

工程地质报告应说明以下各项内容：

（1）勘察等级、执行标准、采用的勘探手段等。

（2）塔位地基稳定性评价及范围，有无影响杆塔稳定性的不良地质条件及其危害程度。

（3）沿线主要地层结构及其均匀性，以及各岩土层的物理力学性质。

（4）地下水的埋藏情况、类型、水位变化幅度及规律，以及对杆塔及基础材料的腐蚀性。

（5）地震基本烈度。

（6）逐基（必要时逐腿）提供与设计要求相对应的地基承载力及变形计算参数，并对设计及施工应注意的问题提出建议，主要包括塔位的地形地貌及地下水情况，各岩土层的物理力学性质（如岩土名称、深度范围、岩土性质、状态、重度、凝聚力、内摩擦角、承载力特征值），山区塔位还应提供覆盖层的厚度、岩石的风化程度和坚硬程度、岩石等的抗剪强度及防护措施。

（7）必要时，说明冻土深度、矿产分布情况等。

十一、水文气象报告

（一）气象部分

对可研和初步设计的气象报告进行整理，补充施工图阶段沿线对微气象区的调查结论，明确气象分段情况和特殊段的设计要求，主要内容包括：

（1）工程概况、沿线区域地理环境概况、沿线气象台站概况、主要参考依据及资料说明。

（2）主要气候特点、相对湿度、雾、日照、降水、沿线风向分析。

（3）对线路沿线微气象区进行调查，分析是否存在微气象区，对存在的微气象区提出应对措施。

（4）沿线气温概况、设计气温的取值。

（5）复核沿线最大风速情况，确定全线风区划分。

（6）复核沿线覆冰天气、邻近区域冰雪事故及已有运行线路设计覆冰厚度和运行情况，确定设计覆冰厚度及冰区划分。

（7）必要时，提供稀有风速和覆冰的验算条件。

（8）设计雷暴日数。

（9）设计气象条件组合及适用区段。

（二）水文部分

对可研和初步设计的水文报告进行整理，补充施工图阶段对沿线水文的调查结论。主要内容包括：

（1）说明对线路有影响的河流、水库（含规划的）等水利设施进行复查的情况。提供流域面积、各种洪水位、最大洪峰流量、最高船桅高等水文资料，并对河流、水库附近塔位的稳定性及施工图设计的注意事项提出建议。

（2）列表明确施工图阶段所跨越的河流、水库，并明确跨越点的塔号、跨越导线净空距离、塔位距堤坝的距离，以及是否满足相关部门协议要求。

（3）若需在水中立塔，应提供水位、流速、冲刷深度及漂浮物等资料。

（4）跨越河流、水库等水利设施的有关路径协议。

甲方有要求时，应按甲方要求提供水文气象报告，并单独成册；甲方无要求时，可在施工图总说明相关章节中简述水文气象条件。

十二、预算书

预算内容及深度如下：

1. 工程概况

主要包括路径起讫点、电压等级、路径长度、回路数、曲折系数、设计气象条件（风速和覆冰厚度）、地形地貌、导地线型号、杆塔型式及数量、基础型式及数量、土质分类、运输方式及运输距离、主要经济指标等。

2. 编制原则和依据

主要包括：

（1）初步设计批复文件。

（2）工程量。依据施工图设计说明、施工图图纸及主要设备材料表提出工程的工程量。

（3）预算定额。说明所采用的定额名称、版本及年份。采用补充定额及定额换算和调整时应有说明。

（4）项目划分及费用标准。说明所依据的项目划分及费用标准的名称、版本、年份，以及上述标准中没有明确规定的费用的编制依据。

（5）人工工资。说明所采用的定额人工工资单价及相关人工工资调整文件。

（6）材料价格。说明装置性材料价格的取定依据及价格水平年份，本工程材料招标价格、信息价格采用的时间和地区，国外进口材料价格的计算依据等。

（7）编制年价差。按编制年水平调整材料价差。定额人工费、材机调整应说明所执行的文件。

（8）建设场地征用及清理。说明建设场地征用、租用及拆迁赔偿所执行的相关政策文件、规定和计算依据等。

（9）特殊项目。应有技术方案和相关文件的支持，按本规定要求的深度编制施工图预算。

（10）价差预备费。说明价格上涨指数及依据，预算编制水平年至开工年时间间隔，工程建设周期和建设资金计划等。

（11）建设期贷款利息。说明资金来源、工程建设周期和建设资金计划、贷款利率等。

（12）其他有关说明。预算编制中存在的其他问题。

（13）投资分析。对本工程施工图预算与初步设计概算投资进行简要分析比较，阐述投资增减原因。

3. 预算表及附表应考虑的主要问题

（1）施工图预算的表格形式及分类，按《电网工程建设预算编制与计算标准》的规定执行。

（2）预算表。应包括总预算表（表一乙）、输电线路安装工程费用汇总预算表（表二乙）、输电线路单位工程预算表（表三丙）、输电线路辅助设施工程预算表（表三戊）、其他费用预算表（表四）、建设场地征用及清理费预算表（表七）。

（3）附表。应包括编制年价差计算表、综合地形增加系数计算表（附表一）、输电线路工程装置性材料统计表（附表二）、输电线路工程土石方量计算表（附表三）、输电线路工程工地运输质量计算表（附表四）、输电线路工程工地运输工程量计算表（附表五）、输电线路工程杆塔分类一览表（附表六）。此外，尚应包括为清晰完整表达施工图中的各种工程量所补充的工程量统计、计算表格等。

4. 工程量计算原则

工程量计算应以定额规定及定额主管部门颁发的工程量计算规则为准，严格按照审定的施工图计算工程量。

十三、大跨越设计施工图及说明书

（一）大跨越施工图说明书及附图

1. 施工图说明书的内容及深度要求

应说明施工图设计编制依据、范围、现行标准、

规程及强制性规定的执行情况，以及初步设计及其评审意见执行情况。尚应包括施工图设计阶段的科研试验情况、工程技术特性、经济指标、主要技术经济指标汇总表，以及工程主要设计原则、环境保护、劳动安全和工业卫生、施工和运行注意事项、卷册目录、线路勘测成果目录和附件附图等。

2. 大跨越施工图说明书

（1）概述。说明施工图设计编制依据及范围、大跨越简况、初步设计评审意见的执行情况、主要技术经济指标。范围一般为大跨越耐张段的本体设计，包括井筒、电梯、爬梯、围墙、接地装置及建设单位有特殊要求的运行维护工具房等附属设施，以及根据部队、民航、交通部门提出的警航设施。

（2）跨越方案。说明大跨越的电压等级、地点、跨越方式、回路数、档距、耐张段长度、塔位高程、杆塔呼称高和全高，以及塔位地形地貌、地质和水文条件。说明航道及水利部门对船桅高度、最高通航水位、塔位等要求。

（3）气象条件。说明大跨越基准气象条件、高空风压调整系数和导地线线条设计风速的取值。如施工图设计阶段气象条件有变动，必须重新进行论证。

（4）导线和地线。说明导、地线（含 OPGW）的型号，并列出其物理特性表。说明导地线的最大使用张力和年平均运行张力取值、施工架线原则及要求。

（5）防振和防舞措施。防振措施应包括永久防振措施和临时防振措施，并说明分裂导线的间距、子导线间隔棒或相间间隔棒的安装方法等。防舞措施应包括采取（或预留）的防舞装置型号及安装方法。

（6）绝缘配合。说明污秽区划分、绝缘子型式及片数的选择，以及工频电压、操作过电压、雷电过电压及带电检修的塔头空气间隙取值等。

（7）防雷和接地。说明塔顶和档距中央的耐雷水平，地线对边导线的保护角和接地电阻的要求值，提出加强防雷保护的措施及接地装置的形式。对特殊设计（如避雷针、避雷器、降阻剂、接地模块、导电防腐剂等）应做出安装说明。

（8）金具和绝缘子串。主要说明金具、绝缘子串组合方式，绝缘子和金具的安全系数，以及对非标金具的试制、试验和试组装情况等。

（9）杆塔。杆塔设计情况的简述，包括主要设计原则、杆塔用材料、杆塔结构形式、主要构件截面形式、连接形式、局部特殊构造、杆塔与基础连接方式。说明应用软件、分析方法和主要结果。说明登塔设施、防腐、防松、防卸措施及警航方式。结合工程特点说明各杆塔的使用条件，说明必须提请加工、施工部门注意的事项和要点。对工程中应用的新技术、新材料应做说明。涉及试验项目的应说明试验内容、结论等。

（10）基础。基础设计情况的简述，包括主要设计原则、塔基地形情况、塔位地质条件及水文情况、基础形式及材料、与杆塔连接方式、锚栓规格与材料、防腐措施及对沉降观测等要求。对基础、道路、基坑开挖及回填、弃土、塔位的排水及边坡保护等。应说明加工、施工部门必须注意的事项和要点。对工程中应用的新技术、新材料应做说明。涉及试验项目，应说明试验内容和结论。涉及地震或特殊地质条件时，应说明场地稳定性分析结论及采取的措施。江河（海）中的塔位，则需说明对水流冲刷和漂浮物、船舶等撞击的防护措施。

（11）环境保护。说明执行国家环境保护、水土保持和生态环境等相关法律、法规的情况，以及本工程（包括一般线路段）的环评、水土保持、压覆矿产、地质灾害、地震灾害、文物等评估报告的情况及采取的保护环境措施。

（12）劳动安全和工业卫生。强调大跨越施工和检修时，应遵守《电业安全工作规程》中的有关规定，防止由于邻近输电线路产生电磁感应电压而引起的人身安全事故。说明按国家相关规定，做好防火、防爆、防尘等安全工作，以及卫生工作的情况等。

（13）辅助设施。包括大跨越航空警示装置（航空障碍灯和航空警示漆）的安装要求，海中基础的警示装置说明，电梯的安装及运行维护要求，外接电源的说明等。

（14）施工和运行注意事项。提出施工单位在架线、绝缘子串组装、防振、接地、杆塔、基础等施工作业时的施工要求和注意事项，以及对运行部门应提出的相关要求和注意事项。

（15）主要技术经济指标。列出初步设计的批准修正概算和施工图预算的大跨越综合投资、本体投资，以及导线、普通地线、OPGW、绝缘子、金具、杆塔钢材、基础材料、基础混凝土、土石方量等主要技术经济指标，并说明施工图各项指标的合理性。

（16）附件。列出初步设计评审意见和相关的协议文件，以及其他必需的文件（包括科研试验评审意见）。

3. 附图

（1）大跨越段路径图（1∶1 万）。大跨越路径图一般应包括跨越路径以及两端常规线路走向；线路走廊的有关设施、地物；跨越段各档档距；耐张段长度及转角；跨越塔、锚塔位置及塔型；跨越塔、锚塔坐标一览表；指北针及其他图示要求。

（2）大跨越塔型一览图。给出各类塔型图，并注明相应的名称。列表给出每种塔型的使用范围，以及对应各种塔型的主要尺寸和材料指标。

（3）大跨越基础一览图。给出各类基础简图，并注明相应的名称。列表给出每种基础的使用范围，以及

对应各种基础的主要尺寸和材料指标。

（二）平断面定位图及杆塔位明细表

1. 平断面定位图

应包括对地（水面）距离校验、风偏校验、耐张串倒挂校验、悬垂角校验、悬点应力校验、交叉跨越物校验，以及平面地物分布、塔位位置、杆塔名称、呼称高、全高、档距、耐张段长度、转角度数、代表档距、船桅高度、最高通航水位等内容。

2. 杆塔位明细表

应包括明细表说明、杆塔型及呼称高、档距、水平档距、垂直档距、代表档距、耐张段长度、转角度数、金具串名称、防振和防舞装置数量、间隔棒数量、接地装置型式、相对中心桩高差、交叉跨越物名称及数量等内容。

（三）机电施工图及绝缘子串组装图

1. 导地线特性表（曲线）

应包括设计气象条件、物理特性与比载表、各种气象条件下的张（应）力表（曲线）等内容。

2. 导地线张力弧垂放线表

应包括物理特性与比载表、各架线温度时的弧垂和张（应）力表，并应注明补偿初伸长的方法及数值，以及对弧垂施工误差的特殊要求等。

3. 跳线施工图

应包括耐张塔跳线安装示意图、跳线施工弧垂及允许误差、跳线参考线长等内容。

4. 导地线防振和防舞措施图

防振措施图应包括永久和临时防振装置型号、数量、安装方法，以及其他有关的施工要求。防舞措施图应包括防舞装置型号、数量、安装方法及其他有关的施工要求。

5. 绝缘子串组装图

应包括导地线耐张、悬垂和跳线绝缘子串型式，以及新研制的金具加工图等内容。

6. 导线间隔棒安装图

标明间隔棒的型号，列出各档的间隔棒安装数量和距离。

7. 接地装置图

应绘出正面图和平面图，接地引下线和杆塔连接图，并应列出施工要求等。

8. 导地线架设示意图

应包括导地线的布置情况，以及导线的相序安排等内容。

9. 跨河警告牌组装图

应绘出警告牌的尺寸，并说明在河岸的安装位置等。

10. 航空警示装置图

应有产品说明、安装图和零部件加工图。对航空障碍灯和航空警示漆的具体要求由协议确定。对于电源或敷设方法应根据工程的具体条件决定。

（四）杆塔结构图

1. 杆塔本体结构图

杆塔本体结构图内容深度除满足一般线路杆塔结构图的规定外，还应包括：

（1）设计图纸的说明应着重对钢结构加工要求，特别是对焊缝等级及焊缝质量检查要求及对连接螺栓的使用和加工要求进行说明。

（2）结构图中应重点突出重要节点的大样图及对加工和安装的要求，同时宜考虑安装所需附件设置。锚塔结构图的总图中还应包括平面布置图，标明跨越侧和非跨越侧的方向和转角度数。

（3）附属设施包括井架（井筒）、爬梯、平台及走道等。附属设施结构图应单独成册，内容包括总图、分段结构图、加工说明和各种附属设施结构图。

2. 杆塔计算

（1）杆塔结构布置应满足计算假定，必要时采取其他有限元软件计算复核或采取模型试验验证。

（2）杆塔风荷载应分段计算，结构体型系数参照GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》选取，必要时采用风洞试验验证。杆塔荷载应考虑附属设施的附加挡风面积和自重。

（3）计算工况应考虑跨越侧与非跨越侧风荷载不同和顺线风引起的纵向不平衡张力，以及不均匀覆冰产生的不平衡张力。

（4）安装（检修）工况的荷载组合应考虑实际可能发生的导地线安装顺序和安装方式，无法确定时，应在设计文件中加以说明。当跨越耐张段与一般线路不同期架设时，跨越耐张段应考虑单侧有导地线张力的作用，并采用相应的荷载组合进行计算和采取必要的技术措施。

（五）基础施工图

1. 基础本体施工图

大跨越基础施工图宜单独成册，图纸内容深度应包括施工说明、基础的平面布置图、基础总图及材料明细表、配筋图、与杆塔连接图等，应满足基础加工、施工和验收的要求。

（1）基础施工说明中应包括基础设计及施工应遵循的规范、规程和规定，采用基础型式的特点，所采用材料的等级及性能要求和施工注意事项等内容。

（2）基础平面布置图中应包括基础的平面位置，基础沉降观测点的设置，基础保护措施等。耐张塔还需包括跨越侧和非跨越侧的线路方向及转角度数，基础的预偏方向及预偏值。

（3）基础总图中应包括基础的平面图和立面图。应绘出定位轴线、基础标高、基础垫层、基础构件的

位置及主要尺寸。列表说明各种材料的类别、等级和用量。

（4）配筋图中应绘出平面、剖面及配筋，标注总尺寸、分尺寸和定位尺寸，说明受力钢筋的保护层厚度、钢筋锚固长度、搭接长度、连接方式及要求，说明施工缝的位置及处理要求。桩基应绘出桩详图、承台详图及桩与承台的连接构造详图。列表说明所用材料的编号、规格、等级、长度、数量和用量。

（5）与杆塔连接图应根据具体连接方式绘出详图并列出相应材料表。

（6）涉及围建及场地平整的塔位宜提供围建及场地平整施工图并单独成册，内容包括施工说明、围建或场地平面布置图、围建或场地平整剖面图、土石方平衡图等。

（7）必要时提出基础保护措施，绿化范围和措施。

（8）必要时提出特殊的施工及防腐要求。

2. 基础计算

基础计算内容包括上拔稳定、下压地基承载力、倾覆稳定、基础自身强度、连接强度和构造设计等，必要时进行抗震设计和场地稳定性计算分析。特殊基础形式还要满足相应的计算要求。

（六）工程地质报告

工程地质报告应包括以下内容：

（1）说明勘察资质、执行标准、采用的勘探手段等。

（2）说明地理位置、地形地貌及地质条件。

（3）说明塔位地基稳定性评价及范围。

（4）说明塔基区域岩土层时代及成因、类型、构造及岩性等。

（5）进行塔腿处岩土状态描述、确定岩土物理力学指标、塔基岩土地基承载力及抗剪强度等。

（6）提出对不良地质作用的防治及地基处理措施。

（7）调查堤防设施的级别和塔基处可能存在的主要岩土工程问题。

（8）调查地下水的埋藏情况、类型、水位变化幅度及规律，以及对杆塔及基础材料的腐蚀性。

（9）调查地震基本烈度及土壤电阻率，必要时说明冻土深度、矿产分布等。

（10）提供岩土力学钻孔柱状图、地质剖面图、塔位综合地质图、勘探点主要指标一览表、土工试验成果表及水质腐蚀性分析成果表等。

（七）水文气象报告

水文气象报告应包括以下内容：

（1）在初步设计阶段工程水文勘测的基础上，根据工程需要，进一步补充、修改和完善塔位处的水文资料。

（2）应对初步设计阶段遗留问题和客观条件的变化所引起的结论合理性进行分析论证，全面复核塔位的安全。

（3）调查与补充搜集跨越水域（江河、湖泊、水库、海湾与河口）的水利水电工程、防洪（防潮、防涝）工程规划、防洪标准以及航道规划等的设计条件及其变化情况。

（4）调查与补充搜集跨越地段的河势、海岸(滩)、湖岸、库岸以及塔位处岸坡与治理工程等在初勘后的具体变化。

（5）调查与补充搜集跨越地段工程水文要素（如大风、重冰、洪水、大潮、大浪等）特大值出现情况。

（6）对初步设计阶段工程水文勘测的遗留问题，应进行专题搜资、调查与分析。

（7）在补充调查搜集资料的基础上，分析计算塔位处的各种设计水文要素，对初步设计阶段的水文分析计算成果进行复核。

（8）对大跨越塔位的工程水文条件做进一步分析论证，并编写施工图设计阶段的工程水文勘测报告。

（9）进行跨越水域稳定性的补充分析，预测今后30～50年水域演变发展趋势对塔位安全的影响。

（10）进行跨越地段水文要素特大值的出现和客观条件变化的分析论证，提出有关确保塔位安全的工程治理措施的意见或建议。

（11）提供跨越断面的设计洪水及设计流速计算成果。

（12）提供跨越断面的河床演变与冲刷分析成果。

（13）提供溃堤、溃坝洪水对塔位影响的分析与计算成果。

（14）当跨越海湾、河口时，提供跨越断面的设计潮位及波浪要素的分析与计算成果。

（15）当跨越海湾、河口时，提供跨越断面的海流分析计算成果及岸滩稳定性分析成果。

（八）设备材料表

（1）电气部分设备材料表应有工程概况、导地线型号、绝缘子型号、损耗率及备品备件等的简要说明，以及主要设备材料的机电物理技术参数和特殊要求等。

（2）结构部分设备材料表应有杆塔和基础型号、基数、损耗率等的简要说明，以及备品备件的特殊要求等。

（九）预算书

1. 预算书内容

大跨越工程施工图预算的编制应执行国家发展和改革委员会发布的《电网工程建设预算编制与计算标准》，包括但不限于以下主要内容：编制说明、输电工程概况及主要技术经济指标表（表五丙）、架空输电工程总预算表（表一乙）、架空输电线路安装工程费用汇

总预算表(表二乙)、架空输电线路单位工程预算表(表三丙)、输电线路辅助设施工程预算表（表三戊)、其他费用预算表（表四)、建设场地征用及清理费用预算表（表七)、编制年价差计算表、综合地形增加系数计算表（附表一)、输电线路工程装置性材料统计表（附表二)、输电线路工程土石方量计算表（附表三)、输电线路工程工地运输质量计算表（附表四)、输电线路工程工地运输工程量计算表（附表五)、输电线路工程杆塔分类一览表（附表六)。

2. 预算书深度要求

(1) 预算编制说明。编制说明应简练、明确、有针对性，内容主要包括：

1）工程概况，应包括大跨越工程所在地区、跨越方式、大跨越耐张段长、跨越档距、大跨越塔高、设计风速及覆冰、导地线型号、杆塔及基础形式、地形划分、地质情况、材料运输方式及运距等基本信息。

2）编制原则及依据，应包括工程量计算原则及依据、费用项目划分原则、采用定额标准、主要材料价格来源等信息。

3）投资水平，应包括动态投资、静态投资、本体投资等主要投资指标，如预算总投资超出批准的初步设计概算总投资，应说明超出的主要原因。

4）其他需要说明的重要事项。

(2) 工程量计算应以审定的施工图纸为依据，以定额规定及定额主管部门颁发的工程量计算规则为标准。

(3) 定额执行电力行业定额（造价）以及主管部门颁发的最新定额和相关规定。

(4) 定额中缺项或不适应的，应优先参考使用相似建设工程的定额，无参考标准时，需根据工程的具体情况编制补充定额。补充定额应符合现行定额编制管理的规定，并报电力工程定额管理机构批准后使用。

(5) 因工程需要，大跨越工程设计或施工中需要采用特殊设计或施工方案，其费用与现行定额或一般技术条件下的费用差异较大，又不宜编制补充定额的，可编制专题报告或专项施工组织设计，并根据相应的要素投入确定预算费用，由工程主审部门另行核定。以上专题报告或专项设计作为预算书的附件。

(6) 土地征用、施工场地租用、林木及青苗补偿、建构筑物补偿、厂矿补偿、河流航道补偿及其他大额补偿等费用的计算应按照国家及工程当地政府部门有关规定和标准计算，并应在预算书中注明费用计算依据。

(7) 价差预备费、建设期贷款利息及其他特殊费用项目的计算在相应栏目表述不清时，需单独附表计算。

(8) 预算编制完成后，应将预算投资与审批的初步设计概算投资作投资对比分析，并填写相应投资对比分析表。投资对比分析表可不作为成品出版，但需作为备审资料留存。

十四、工程技术档案资料

工程技术档案资料，包括原始设计资料、图纸及设计书资料和工程设计总结资料等，为存查和设计资料的使用，均要归入技术档案。技术档案归档内容主要包括以下几方面。

(一) 原始设计资料

(1) 工程设计任务书及设计合同；
(2) 上级和有关单位的来往文件及会议纪要；
(3) 收集的设计资料和协议文件；
(4) 勘测的调查报告及原始记录；
(5) 各专业的原始设计条件；
(6) 计算书及原始图纸资料；
(7) 各专业互相提供的资料；
(8) 处理施工工地问题的资料；
(9) 工程大事记本。

(二) 工程设计图纸及设计书出版的资料

(1) 初步设计和施工图设计的设计计划；
(2) 工程设计的可行性研究报告；
(3) 初步设计和施工图设计全部图纸及设计书；
(4) 概算书和预算书；
(5) 测量、地质及水文出版的资料；
(6) 工程设计定位手册；
(7) 新技术科研试验及调查报告。

(三) 工程设计总结资料

(1) 工程设计的质量调查报告；
(2) 工程设计的运行回访报告；
(3) 工程设计总结；
(4) 评选优秀设计的资料；
(5) 工程设计事故调查报告资料。

第四节　竣工图设计

竣工图设计是指线路工程竣工后，按工程实际施工情况所编制的图纸和文件。这些图纸和文件包括由于设计原因对施工图的修改和由于工程施工情况变化对施工图的修改。新建、改建的线路工程项目，在竣工后均要编制竣工图。竣工图要完整、准确、真实地反映项目竣工时的实际状态。通常设计单位受项目建设单位的委托编制竣工图。

一、编制要求

竣工图委托方应负责收集编制竣工图文件所需的原始资料，包括设计、施工、监理、调试和建设单位

在项目建设过程中的有效记录文件和变更资料等，汇总后提交给竣工图编制单位。

竣工图编制单位应以施工图最终版为基础，并依据由设计、施工、监理或建设单位审核签字的变更通知单工程联系单澄清单等与设计修改相关的文件，以及现场施工验收记录和调试记录等资料编制竣工图。

建设过程中发生修改的施工图应重新编制竣工图。新编制的竣工图应采用施工图图框和图标，“设计阶段”栏为“竣工图阶段”，阶段代码应用“Z”或状态代码标识。卷册编号和图纸流水号同原施工图。若有新增卷册，其卷册号在专业卷册最后一个编号后依次顺延。若卷册中有新增图纸，其编号在该册图纸的最后一个编号后依次顺延。

建设过程中未发生修改的施工图，其竣工图可套用原施工图，也可重新编制。

竣工图编制单位应编制竣工图总说明，其内容宜包括竣工图委托方、编制依据、编制原则、编制方式、范围和深度、特殊要求、竣工图图纸目录等。各专业可根据需要编制专业说明。各卷册应附有本册图纸的修改清单表，表中应详细列出变更通知单、工程联系单、澄清单等与图纸修改相关的清单和编号。

所有竣工图应由编制单位逐张加盖竣工图章，竣工图章应使用红色印泥，盖在图标栏附近空白处。常规线路采用图 1-1 竣工图章。国家重大建设项目工程宜采用图 1-2 竣工图章，签名为竣工图编制人和技术负责人，必须用不易褪色的黑墨水书写，严禁使用纯蓝墨水、圆珠笔、铅笔等易褪色的书写材料书写或盖章。竣工图章中的各栏目应填写齐全。

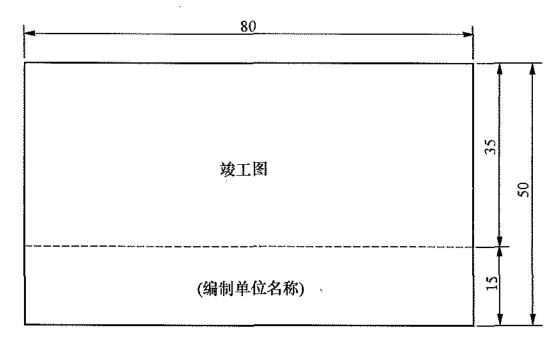


图 1-1 常规线路竣工图图章样式及尺寸（单位：mm）

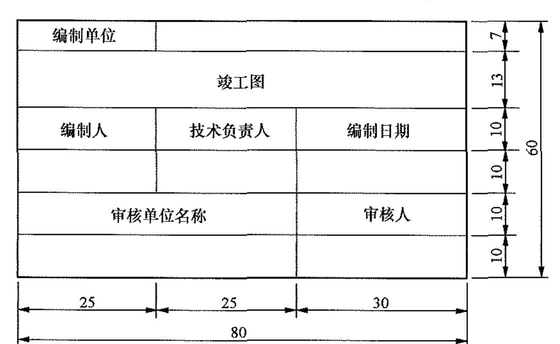


图 1-2 国家重大建设项目工程竣工图图章样式及尺寸（单位：mm）

二、范围和内容深度

1. 竣工图的编制范围

竣工图的编制范围宜为一级图、二级图、三级图和部分重要的四级图，不包括五级图。可根据建设工程项目具体情况或合同约定的内容酌情调整。

输电线路工程图纸分级如下：

一级图宜包括线路路径图，全线杆塔一览图。

二级图宜包括全线基础一览图，材料总表，两端变电站进出线平面布置图，全线导线换位图。

三级图宜包括导地线力学特性曲线、放线曲线，线路平断面定位图，杆塔明细表，导地线绝缘子串及金具组装图，与电信线路平行接近位置图，防震措施，接地装置安装图，杆塔结构图，基础施工图，各类杆塔单线图，各类杆塔组装图。

四级图宜包括防雷保护接线、安装图，屏蔽地线接地、放电管接地装置安装图。

2. 竣工图的内容深度要求

在竣工图出图范围内的成品内容深度应符合施工图设计深度规定的要求。

涉及多专业的变更部分，与之相关的卷册均应进行修改，变更表示应对应一致。

三、竣工图审核

新编制的竣工图内部审核应由编制单位负责，宜由编制人完成、技术负责人审核并在图标上签署。

国家重大建设项目工程的竣工图委托方应明确竣工图的审核单位。审核单位应对竣工图的内容与变更通知单、工程联系单、澄清单等与设计修改相关的文件，以及施工验收记录和调试记录等的符合性进行审核。审核单位在审核后应在竣工图章中的审核人栏中签字。

对常规输电线路工程竣工图，如有审核单位，审核单位宜在验收文件上签字。

四、印制、交付与归档

（1）竣工图宜由竣工图编制单位负责印制。印制后的竣工图应按现行国家标准 GB/T 10609.3《技术制图　复制图的折叠方法》的规定执行。

（2）竣工图编制单位应将印制后的竣工图，按照合同约定提交给竣工图委托方。

（3）竣工图编制单位在竣工图编制工作完成后，应将变更通知单、工程联系单、澄清单等编制依据性文件归档。

（4）竣工图编制单位应存档印制后的竣工图。

第五节 设 计 流 程

线路设计可行性研究设计、初步设计、施工图设计、竣工图设计各阶段的典型设计流程，见图 1-3～图 1-6，供设计参考。

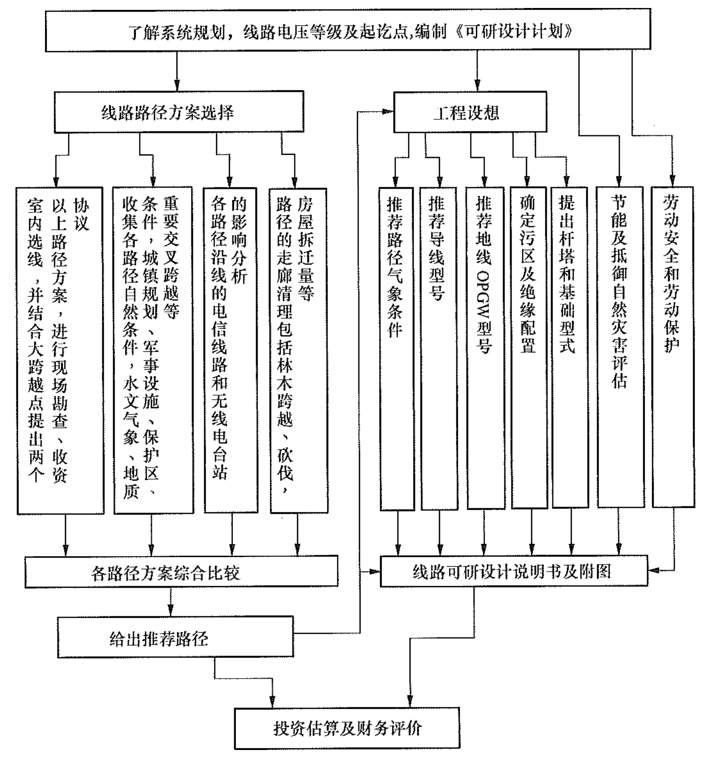


图 1-3 输电线路可行性研究设计典型流程图

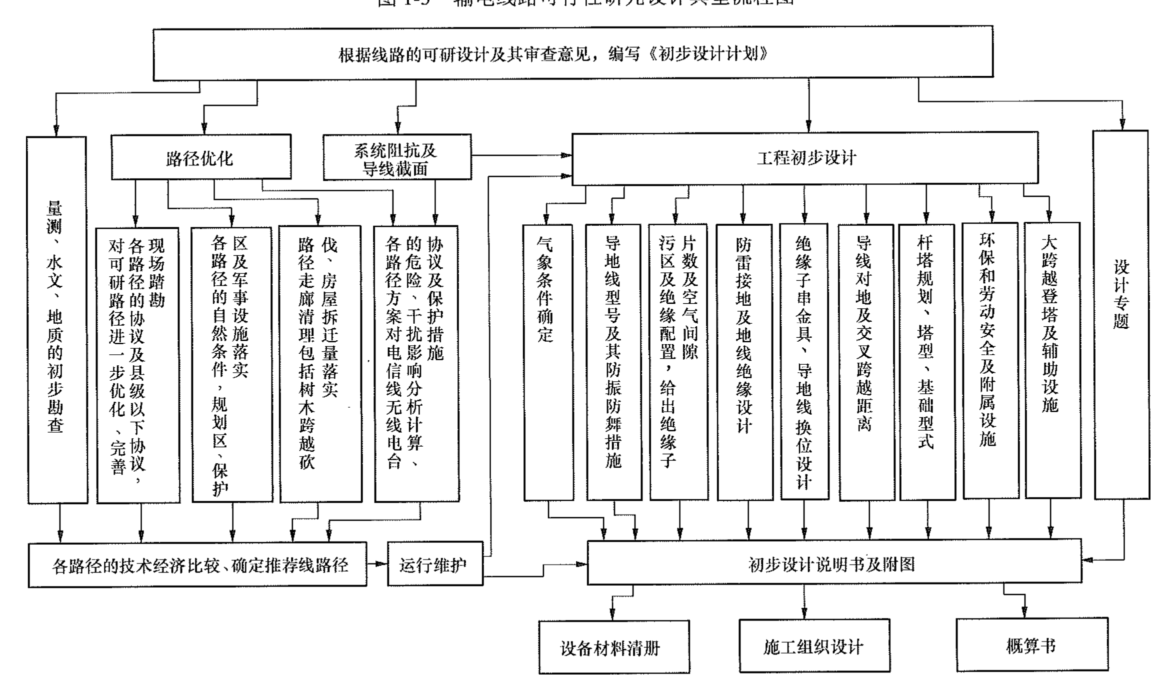


图 1-4 输电线路初步设计典型流程图

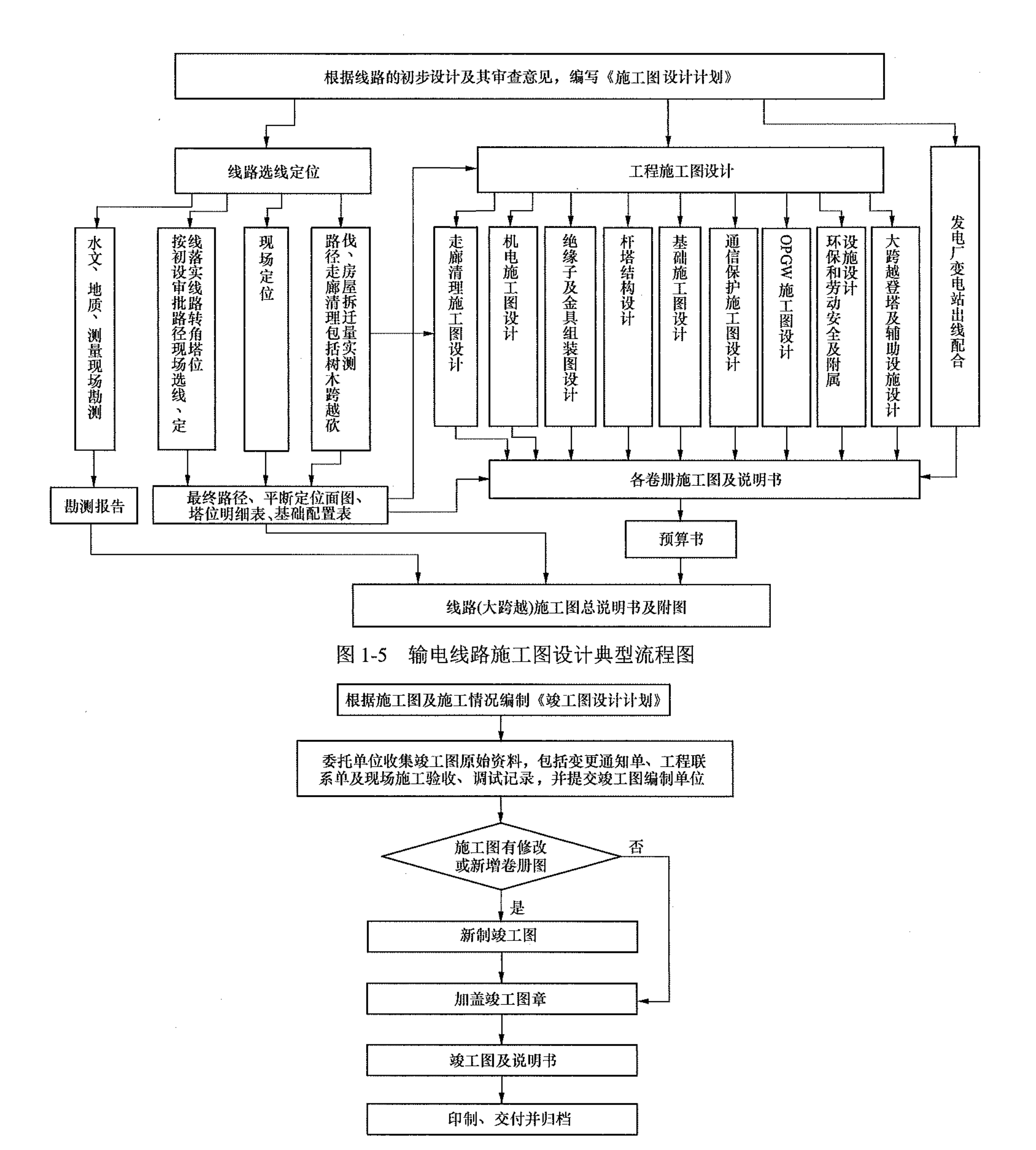


图 1-5 输电线路施工图设计典型流程图

图 1-6 输电线路竣工图设计典型流程图

第二章



路　径

架空输电线路的路径是指线路从起点变电站到终点变电站在地面上的全部路由。输电线路路径的走向直接影响线路的经济性、线路本身的可靠性、周围环境的协调性、施工难度及周期的合理性，对运行维护的便利性起着决定性作用。架空输电线路路径选择是线路工程设计的重要环节。

第一节　路　径　选　择

输电线路路径选择的目的，就是要在线路起讫点之间，选择一条全面符合国家各项方针政策及相关方要求的输电线路路径。在路径选择时，既应考虑电力系统的安全可靠、经济合理、施工及运行方便，又要符合城乡规划、国防建设、航空事业、无线电收发、通信传输等行业的协议要求，还应满足自然环境保护和生态平衡的要求。

一、路径选择的原则

输电线路路径方案的选择是输电线路设计的重要内容之一，应结合电力系统论证、变电站站址选择等，开展路径的选择工作。在输电线路路径选择时应充分考虑地方规划、压覆矿产、自然条件（海拔、地形、地貌）、水文气象条件、地质条件、交通条件、自然保护区、风景名胜区和重要交叉跨越等因素，重点解决线路路径的可行性问题，避免出现颠覆性的因素。

结合有关规范、规程及有关导则中对线路选择的要求，本着保障线路安全和贯彻以人为本、环境友好（与自然环境及与其他建设项目相协调）的精神，输电线路路径选择应遵循以下原则：

（1）贯彻国家的基本建设方针和技术经济政策，做到安全可靠、技术先进、经济合理、资源节约、环境友好、符合国情。

（2）输电线路路径选择应具有前瞻性、科学性、严肃性。结合地方总体规划，统筹规划输电线路走廊，优化输电线路的走向和走廊宽度，提高其整体利用率。

（3）对输电线路的路径方案应进行综合技术经济比较，方便施工运行。可行性研究、初步设计阶段原则上应选择两个及以上可行的线路路径，大规模线路宜采用高分辨率卫星影像或航空影像、全数字摄影测量系统等技术辅助路径方案的选择，力求准确提供沿线地形、地貌、地物等基本特征，对线路方案进行精细优化。

（4）路径选择时应充分征求地方政府及有关部门对路径方案的意见和建议，应取得规划、国土、军事、环保、林业等部门对路径方案的批准协议。路径方案应满足与铁路、高速公路、机场、雷达、电台、军事设施、管线、油（气）库、爆破器材生产或储存仓库、采石场、烟花爆竹工厂等各类障碍物之间的安全距离要求或相关协议要求。

（5）输电线路路径选择应避开军事设施、大型工矿企业等重要设施及原始森林、风景名胜区、一级水源地保护区及自然保护区的核心区和缓冲区等，当无法避让时，应进行充分论证并采取必要的措施。

（6）路径选择宜避开不良地质地带、采动影响区、重冰区、易舞动区、微气象微地形等影响线路安全运行区域，当无法避让时，应进行充分论证并采取必要的措施。

（7）线路路径选择宜避让林木密集覆盖区，对协议允许通过的集中林区、宜林地、果园、经济作物区，一般应根据树木自然生长高度按跨越设计，以减少树木砍伐和对生态环境的影响。

（8）输电线路路径选择应尽可能靠近现有国道、省道、县道及乡村公路，改善交通条件，方便施工和运行。

（9）输电线路路径选择应以人为本，尊重当地民俗，尽量少拆迁房屋，选择利用率较低的土地通过。

（10）输电线路路径选择应在有条件的情况下，尽量减少交叉跨越已建的输电线路，以降低施工过程中的停电损失，提高安全可靠性。

（11）线路设计过程中要充分跟踪沿线在建、拟建输电线路、公路、铁路、管线、航道及其他设施的建设进展，避免相互冲突。

（12）涉及大型厂矿拆迁、封闭的区域，需在路径长度、工程投资、拆迁补偿、实施难度等方面进行多方案技术经济比较，确定合理的路径方案。

（13）大跨越段线路的跨越位置应结合陆上线路路径方案，通过综合技术经济比较确定。

（14）设计人员在路径方案的选择中，应充分利用“线中有位，以位正线”及“线位结合，以线为主”的原则指导路径方案的比选。“线中有位，以位正线”及“线位结合，以线为主”的原则主要体现在如下三个方面：

1）路径方案的选择应以线为主，坚持合理的路径走向，不要因局部塔位布局不合理而随意改变路径走向。

2）当路径走向遇有极不合理或难于立塔（如倒石堆、地下溶洞、陡峭山坡）的不良塔位时，应适当修正路径走向予以避让。

3）当路径方案进行比选时，若两方案在地形、地物等的分布及路径长度上难以取舍，则可对该方案进行优化排杆位，比较其技术经济性，以决定优劣。

二、路径选择的特点

路径选择的特点主要表现在以下两个方面。

1. 路径选择的综合性

路径选择是多部门、多专业努力的综合产物，其综合性主要表现在以下几方面。

（1）路径选择是多部门协商的成果。

线路路径途径城镇、厂矿、机场、军事保护区、各种自然保护区、规划区附近，并与各种管线、铁路、公路交叉，这就需要与这些设施的主管部门协商并签订允许线路通过的协议。因此，协议工作对输电线路路径方案的选择至关重要。为做好协议工作，要求协议工作人员不但应对线路情况比较熟悉，而且应对所涉及的协议对象有一定的了解，应确切地了解协议对象的一些具体的技术规定及实际的规划和要求。同时，也要求协议工作者应具有一定的社交能力，这样才能恰当地取得与之有关的协议成果。

（2）路径选择是勘察设计各专业相互配合的成果。

线路路径方案的选择，涉及线路电气、线路结构、环境保护、测量、地质、水文等各专业，因此，它是多个专业共同努力的设计成果。

2. 路径选择的时效性

线路路径方案的选择需与沿线所涉及的单位和部门签订允许线路通过的协议。随着国民经济的飞速发展，各行业、各部门的发展规划将不断更新，建设规模也不断扩大，从而导致原先所签订的路径协议受到影响，难以实施。尤其当协议签订后的间隔时间较长时，更会使得已签订的协议失效。这就充分体现了协议的时效性，即路径方案选择的时效性。鉴于此，设计者必须在每个设计阶段（如初步设计、施工图设计阶段），对路径协议进行复查。即使在同一设计阶段（如初步设计阶段），当持续时间较长（如在初步设计过程中出现缓建，暂时停建等）时，也应对路径协议进行复查。

三、路径选择的注意事项

（1）对协议允许通过的集中林区，线路应尽量在树木稀疏的地域通过，应避让林区内的母树林及珍贵稀有树种区域。对线路通道内零星保护树木或古树，应尊重当地风俗习惯，因地制宜地采取避让或高跨等有效措施。

（2）在选择输电线路路径时应避让自然保护区的核心区和缓冲区；风景名胜区的核心景区，森林公园的珍贵景物、重要景点和核心景区，地质公园的地质遗迹保护区、饮用水水源一级保护区等法律禁止区域。

（3）在选择输电线路路径时宜避让已有的各种矿产采空区、开采区、采动影响区及规划开采区。若不能避让，同塔多回线路在穿越矿产采空区时，宜采用单回路通过，以减少地面塌陷对线路的影响，同时通过基础结构设计，提高杆塔基础对地基变形的适应能力，方便发生地基沉陷后杆塔基础的修复。

（4）在选择同走廊架设的多回线路路径时，应充分考虑电磁环境、电气距离、横担长度、塔位布置等影响线路走廊宽度的因素，确保在安全可靠的前提下，减少走廊宽度与拆迁，降低工程投资。

（5）已运行线路开断接入变电站工程在选择路径方案时，要充分考虑永临结合，并结合建设时序，对提前预留、一次建成、站口搭接等方案进行比较，确保线路间相互影响最小。

（6）由于军用机场、民用机场、军民合用机场对线路有不同的净空要求，在选择输电线路路径时应注意采用不同的规范或标准。

（7）在选择输电线路路径时，应注意各类无线台站、地震台、地磁台、管线等设施对各电压等级的交直流线路有不同的安全距离要求。

（8）在选择输电线路路径时应注意参考输电线路涉及地区的风区、污区、冰区、舞动区、雷区分布图，综合考虑各种因素的影响，力争做到安全可靠、经济合理。

第二节 路径选择方法、内容深度及流程

一、路径选择的方法

输电线路工程的设计通常有可行性研究、初步设

计、施工图设计和竣工图设计几个阶段，各阶段是按先后依次进行的。线路的路径选择主要是在可行性研究和初步设计阶段进行。在施工图设计阶段，当遇特殊情况需对局部路径进行调整时，也要进行线路的路径选择。通常各设计阶段的线路路径选择工作内容如下。

（一）基本资料的准备

可研、初设或施工图设计阶段在选线前都要收集线路的基本资料，包括以下内容：

（1）收集电力系统规划的结论及本工程建设必要性资料。

（2）收集线路起讫点及中间落点的位置、输送容量、电压等级、回路数、导线截面及分裂根数。

（3）收集变电站的进出线位置和方向、与已建和拟建线路的相互关系，以及是否需要预留其他线路通道等资料。

（4）收集新建变电站的出线走廊规划情况及近远期过渡方案。

（二）地形图的收集

输电线路的路径选择通常是在地形图或卫星照片上进行，一般规模的线路采用1∶5万或1∶10万地形图或卫星照片进行路径选择，因此需要收集线路起讫点航线两侧适当宽度1∶5万或1∶10万的地形图。对较大规模的线路工程视情况还需要收集1∶25万、1∶50万或1∶100万的地形图来呈现路径的全貌。对变电站进出线段或线路途经走廊拥挤地段等情况，根据需要可收集如1∶1万、1∶2000等比例的地形图来更准确地呈现路径的走向。

（三）路径方案选择的方法

输电线路的路径方案选择通常有两种方法。一种是传统的人工在地形图上选择线路走向的方法，即传统方法；另一种是借助于卫星照片（简称卫片）、航空照片（简称航片）、全数字摄影测量系统和红外测量等新技术在计算机上进行选择的方法，也可称为数字化方法。

1. 传统方法

输电线路路径选择的传统方法是以传统的地形图为基础，在拼接好的带状图上选择线路路径，其方法和流程如下：

（1）在所收集到的1∶5万或1∶10万的地形图上确定线路的起讫点坐标，即线路两端出线间隔的坐标。

（2）沿着线路起讫点的航线拼接适当宽度的地形图，并画出线路起讫点间的航线。

（3）利用地形图上已有地形地貌、村庄、厂矿、林木、规划及沿航线附近以往工程设计了解到的信息，尽量靠近航线两侧初步规划出两个及以上的路径方案。

（4）按初步规划的各路径方案及本章第三节的收资协议内容进行收资与签订协议。初步设计或施工图设计阶段也可继承上个设计阶段的资料和协议，但对已经取得时间较长的路径协议必要时需重新复核。

（5）根据收资协议所取得的各相关单位对路径走向的建议和要求，结合地形地貌、不良地质地带、采动影响区、重冰区、林区、水源地等自然条件及现场踏勘情况调整路径走向。

（6）通过收资或现场踏勘获知有对路径走向影响较大的设施、城镇规划或协议要求时，则应调整路径走向后按新的路径重新进行收资协议和现场踏勘，直至路径完全获得相关方同意的书面意见。

（7）整理并确认路径，进行通信保护设计，给出完整可行的路径较短的两个及以上路径方案。综合考虑长度、地形地貌、地质、冰区、交通、施工、运行及地方规划等因素，进行多方案技术经济比较，使路径走向安全可靠、环境友好、经济合理。

（8）给出推荐路径方案。

2. 数字化方法

传统方法使用的地形图一般是几年甚至是十几年前绘制的，其所呈现的信息不能很准确地反映当前的线路路径沿线的障碍设施。随着计算机技术、卫星照片、航片、全数字摄影测量系统和红外测量等技术的发展，为能更方便及时地掌握路径附近的设施及近期的发展情况，规模较大的输电线路的路径也采用了数字化方法。具体方法如下：

（1）与传统方法一样，也要在地形图或卫星照片上规划出两条及以上的线路路径，进行收资与协议签订，初步确定至少两个路径方案。

（2）在初步确定的路径方案的基础上，收集沿线的高清卫星照片或进行航飞，利用全数字摄影测量系统进行路径选择。

（3）在地质条件复杂地区，必要时可采用地质遥感技术进行地质勘测，以获得准确的地质情况，避开不良地质区域。

（4）按传统方法（5）（6）（7）的过程选择推荐的路径。

采用数字化的方法充分利用了现代科技手段，能更方便准确地避开已有的障碍设施。卫星照片或航片能获知现场近期的障碍设施，使线路路径的选择更优化，也能更准确地统计线路走廊的清理工作量，使工程设计更加经济合理。

二、各设计阶段路径选择方案的内容深度

根据本节所述，线路的路径方案选择主要在可行性研究阶段和初步设计阶段进行。施工图设计阶段则

主要对初步设计阶段已确定的路径方案予以确定，即进行定线工作。定线，就是用各种勘测手段把在图上已确定的线路路径方案展放到实际地面上。当然，在定线过程中，当遇特殊情况需对局部路径方案进行调整时，也要先进行局部路径方案的重选，然后再定线。现将各设计阶段路径方案选择时的内容深度分述如下。

1. 可行性研究设计阶段和初步设计阶段路径方案选择的内容深度

如前所述，先进行基本资料的准备，地形图、既有障碍物及路径协议的收集，然后在地形图上进行室内路径方案的初选（一般选两个及以上），再进行现场踏勘、收资及调查工作。

（1）室内路径方案初选。

室内路径方案初选，首先利用 1∶5 万或 1∶10 万地形图（有条件时，可利用卫星照片或立体地面模型及正射影像图）进行线路路径的室内优化选线，避开明显的障碍物，合理选择交叉跨越位置，做到“线中有位、以位正线”，以确定最经济合理的路径方案。室内选线所选定的路径，其耐张段长度、立塔的塔位位置以及对邻近障碍物及交叉跨越物的影响等应尽量做到安全、经济、合理，符合规程要求。

（2）现场踏勘、调查并修订路径方案。

室内路径方案初选完成后，即可进行现场路径方案的踏勘调查及协议工作。

现场踏勘应组织输电线路各个专业（电气、结构、技经、测量、地质、水文等）有关人员对线路沿线的地质地貌、水文、气象、污秽、森林覆盖、文物分布、矿产分布、电力设施、军事设施、工业设施、交通状况、城市规划等相关情况进行详细调查了解并签订相关协议；同时在有条件时，尚应结合卫星照片及航片选线方式对路径进行进一步优化，并对拥挤地段、规划区及重要的交叉跨越进行实地勘察及仪器测量，使路径走向避开不良地质地貌地段及重要协议设施。

在现场踏勘中，尚应收集了解沿线污秽、微气象、房屋拆迁资料，对沿线路径进行必要的修正。

由以上所述可以看出，可行性研究阶段和初步设计阶段路径方案的选择，在现场一般只进行沿线调查并收集有关资料，大致落实线路走向并确定线路通过的可能性，只有在重要地段（如拥挤地段、重要交叉跨越地段及某些协议区段）才进行必要的仪器勘测。

此外，可行性研究阶段和初步设计阶段在资料收集及协议签订的深度上略有差异，详情可参见本章第三节所述。

2. 施工图设计阶段路径方案选择的内容深度

施工图阶段应利用勘测仪器把初设所确定并经评审的路径方案展放到地面，即进行定线测量。目前，线路定线一般均采用 RTKGPS（实时动态全球定位系统）进行测量，并使用全站仪或 RTKGPS 测量沿线的交叉跨越及线路附近的障碍物。

应用 RTKGPS 进行定线测量时，首先应将初步设计阶段在地形图上确定的转角坐标展放到地面，并可做适当调整，测量出转角坐标及高程。在此之后，勘测设计人员尚应对两转角之间的直线段内的地形、地物进行沿线（RTKGPS 引导）勘察，使在该直线段内的路径真正落到实处，而且塔位安排也基本合理，不会出现极不合理或难于立塔的塔位。至此，施工图设计阶段的定线工作即行结束，从而使得经可行性研究设计阶段、初步设计阶段所选定的路径方案真正展放到了地面。

线路路径经定线之后，尚应进行平断面测量、定位及交桩工作，详情请参阅本书第十四章第二节。

三、各设计阶段路径选择的流程

（一）可研设计阶段路径方案选择的流程

可研设计阶段方案选择流程框图见图 2-1。

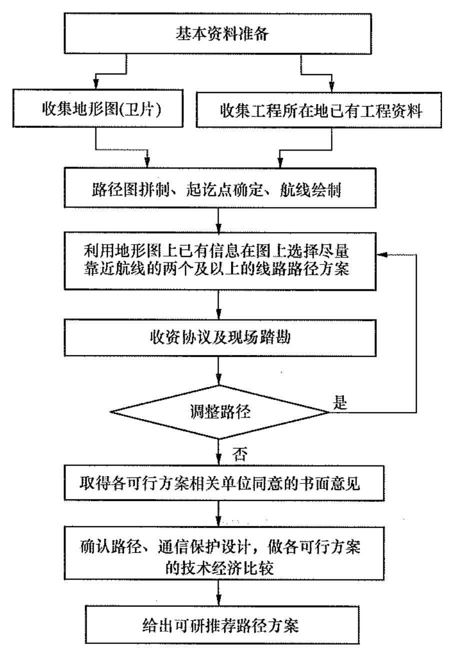


图 2-1 可研设计阶段路径方案选择流程框图

（二）初步设计阶段路径方案选择的流程

初步设计阶段路径方案选择流程框图如图 2-2 所示。

（三）施工图阶段路径选定的流程

施工图阶段路径选定流程框图如图 2-3 所示。

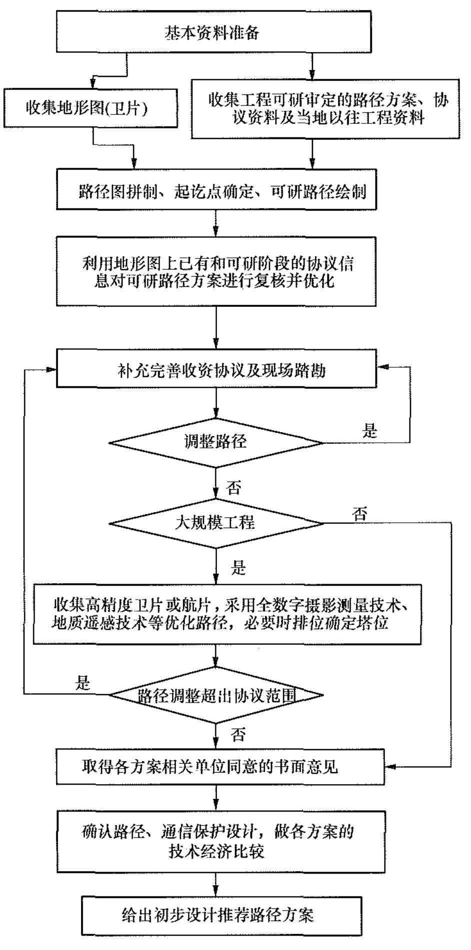


图 2-2　初步设计阶段路径方案选择流程框图

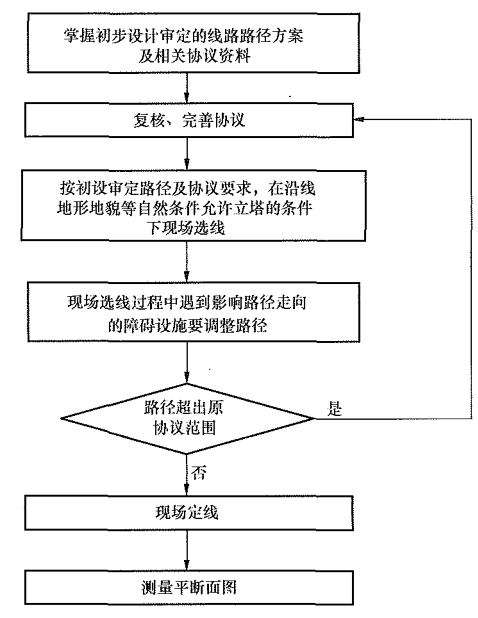


图 2-3　施工图阶段路径选定流程框图

第三节　路　径　协　议

输电线路的路径协议通常包含收资和协议两部分内容。收资是收集线路路径两侧一定范围内对线路走向构成影响的障碍物或设施及其对线路通过的要求。在收资过程中沿线地方政府、军事部门、民航、文物、风景名胜区、自然保护区、电信行业、煤炭、石化及环保等相关部门对线路通过的意见和建议，以及所签订的书面意见统称为协议。

输电线路的路径是线路工程设计的基础。路径的选择直接影响工程的建设投资，也影响到施工的方便性和运行的可靠性，是线路工程设计的重要环节，而线路路径收资协议是确定路径走向的主要依据，因此，路径协议必须做到周密、细致、逐项落实，确保线路路径可靠畅通。

输电线路路径协议的目的就是要使输电线路的建设在符合国家的方针政策的前提下，做到安全可靠、环境友好、经济合理、施工运行方便，避免输电线路的建设与其他相关设施发生冲突而造成资金浪费、建设工期拖延。因此，在进行输电线路设计时，必须认真进行收资协议工作，从全局出发，充分调查研究，签署书面协议。

一、路径收资协议工作范围和深度

输电线路的收资协议贯穿于路径方案确定的全过程。在输电线路工程可研设计阶段应全面开展收资协议工作；在工程初步设计阶段则应对可研阶段收资协议的内容进行复核和补充；在施工图定线阶段尚应注意关键协议资料的复核和落实。

输电线路工程各设计阶段路径收资协议工作的范围和深度如下：

（1）可研设计阶段：收资协议工作应办理县级及以上各有关单位的协议，并视情况办理必要的乡镇协议。

（2）初步设计阶段：收资协议工作除应对可研阶段已办理的协议进行复核外，还应办理线路沿线所有乡镇的协议。

（3）施工图设计阶段：主要对初步设计阶段的关键协议进行复核，并对遗留问题进行落实。

在工程各设计阶段收资协议的有关情况应及时与建设单位沟通，涉及赔偿性的协议则应由建设单位出面签署。

二、路径协议的单位、主要内容及注意事项

输电线路收资协议涉及线路沿线规划、国土资源、地质矿产、地震、文物、环保、气象设施、电信、军事、民航、水利、河运、河道、公路、铁路、石油天

然气、旅游、林业、管道、电力、交通、公安、人民防空和重要厂矿企业等单位。

收资协议的主要内容包括调查和了解有关单位现有或拟建设施，征求其对线路路径的技术要求及意见等。收资过程中应充分了解对方的设施情况与要求，并详细向对方介绍线路的情况，在协商的基础上取得对方同意线路通过的协议。

协议通常有协议书、函件及会议纪要等三种形式，均可在工程设计过程中采用。主要收资协议单位及内容参见表 2-1。

表 2-1 主要收资协议单位及内容一览表

序号	收资协议单位	收资内容提要
1	战区及各兵种司令部等军事部门	邀集或分别到空军、作战、通信、炮兵、装甲兵、后勤等有关单位，了解现有及拟建的与各路径方案有关的军事设施的位置、影响范围及有关规定，取得对路径通过要求或同意的文件
2	省、市、县级规划或建设部门	取得与线路有关的城、镇现有和规划的平面图及同意线路走向的文件，并请提供有关协议单位名单
3	市、县级政府	征求对线路路径的意见，取得同意的书面意见，并征得需进行收资单位的名单
4	省、市、县级环保部门	收集沿线各自然保护区的类型、位置和分布范围；提出线路通过的意见和建议并取得正式同意线路路径走向的书面文件
5	省、市、县级国土资源局	收集沿线土地资源的有关情况，取得同意线路路径通过的正式书面意见，亦可提出需进行压矿及地灾评估的建议
6	省、市、县级地震局	了解沿线各类地震台（站）的分布，并取得同意线路路径的正式意见
7	省、市、县级水利部门、航运、河道、海事管理部门	收集江河上现有及规划的水库、河道、电站、排灌系统等水利设施的位置、淹没范围；收集河流水文资料，其中包括百年一遇洪水位、流速、漂浮物及河道变迁、封冻期的最高冰面、流冰水位及流速、冰块大小等资料。通航河流尚应收集航运及五年一遇时的最高水位、船舶种类、桅杆高度、航道位置。若在水库下方通过时，还应收集水坝建设标准、溢洪道位置和排流方向以及水坝的可靠性等资料。征求对线路跨越水库的意见。取得同意线路路径的正式意见
8	省、市、县级广播事业管理部门	收集现有及拟建电台、电视台天线位置、高度、用途以及对线路通过的要求等资料
9	省、市、县级交通（或公路）部门（包括高速公路管理部门）	收集沿线现有及拟建的公路（包括高速公路）走向、等级及重要桥涵等设施资料，并取得同意线路路径方案的书面意见
10	省、市、县级地方林业部门、省森工部门及下属森工部门	收集沿线各类自然保护区、林木资源的分布情况，包括林区范围、林区性质（如天然林、人工林等）、树木种类、密度、平均树径及自然生长（或采伐）高度等，并取得对线路通过的书面意见和要求
11	省、市、县级旅游部门	收集沿线旅游资源情况，并取得同意线路通过的书面意见
12	市、县级公安部门	了解沿线有无危险物品存放及加工处所（如民爆加工及存放，炸药存放等处所）
13	市、县级人防办	了解沿线有无相关设施及对线路的影响，取得同意线路通过的书面意见
14	市、县级无委会	了解线路路径对无线设施的影响，并取得同意线路通过的书面意见
15	市、县级文物管理单位	了解线路沿线有无文物古迹等资源，并取得同意线路通过的书面意见，亦可提出需进行压覆文物评估的建议
16	各乡镇级政府	了解线路路径对乡镇设施及规划的影响，并取得同意线路通过的书面意见
17	铁路部门及相关铁路设计单位	收集沿线现有及拟建的铁道、通信信号等设施资料及对保护措施的意见，并收集线路运行中的风、冰等灾害资料。取得允许线路通过的协议
18	各级通信公司、通信设计单位	收集沿线现有及拟建的地上及地下通信设施资料及线路运行中的风、冰等灾害资料，征求对通信保护方面意见
19	民航部门	收集现有及拟建的民用与农用机场的位置、等级、起降方向以及导航台的位置、气象资料等，了解影响线路通过的有关规定，取得对方同意的书面意见
20	地质部门及所属勘探部门	收集沿线矿藏分布、储量、品位，开采价值及沿线地质构造、地震烈度等资料
21	矿务部门	收集矿区矿藏分布、开采情况、采空区范围、深度及沉陷情况，以及露天开采时的爆破影响范围，火药库的位置、贮量、库房规格，事故爆炸时影响范围。了解矿区对线路走线有影响的有关设施及技术规定，取得同意线路通过的书面意见

续表

序号	收资、协议单位	收资内容提要
22	煤炭、有色金属管理部门	收集沿线矿藏分布、开发情况、远景规划、设计单位等，并取得同意线路通过的书面意见
23	相关发电厂、变电站、供电公司、电力设计单位	收集线路进出线走廊平面图及走廊内地上、地下设施与涉及的单位，征求对出线走向的意见，收集已有线路的运行资料与设计气象条件等
24	石油、化工管理部门、油田、炼油厂	收集现有及拟开发的油田范围、地上、地下管线、设备等建设位置，以及线路穿过油田时对线路的要求。收集化工厂或炼油厂排出物（气、水、灰等）扩散范围以及对线路的影响等资料，并取得同意线路通过的书面意见
25	火药库、油（气）库、采石场、砂石管理所、沿线工、矿企业	收集建筑设施位置以及正常及事故时对线路的影响范围。采石场尚应了解已开采年限、产值、规模及营业情况（包括有否经政府批准的文件）并取得同意线路经过的书面意见

第四节　路　径　优　化

输电线路的路径优化是通过收资协议、调查和现场勘测，利用卫片、航片、全数字摄影测量技术等，对线路路径走向进行优化，从而达到节约工程投资、便于施工、提高运行可靠性的目的。输电线路路径优化贯穿于路径方案确定的全过程。

输电线路的路径优化需根据电力系统规划的要求，综合考虑线路长度、地形地貌、地质、水文气象、冰区、交通、林木分布、矿产分布、障碍设施、交叉跨越、施工、运行、经济效益、社会效益和环境效益等因素，结合现场勘察情况，对线路路径进行全面的或局部方案优化，使整体路径走向在技术性、经济性、安全性等方面更趋合理。

一般大规模工程还要采用数字化的方法进行线路的路径优化，对特殊区段要通过全数字摄影测量技术获得横断面数据进行排位，并进行多方案技术经济比较来确定路径走向。

输电线路路径方案优化时应注意以下几点：

（1）应综合考虑林区、重冰区、舞动区、微地形、微气象区等因素，通过技术经济比较，优化路径方案。

（2）应尽可能缩短线路的长度、减少转角次数、减小转角角度。

（3）应尽量靠近国道、省道、县道和乡镇公路，方便输电线路的施工和运行。

（4）应尽量避免跨越民房、厂房等建筑物，当无法避免时，对建筑物的距离应满足规程、规范的相关规定。

（5）尽可能远离居民区、减少房屋拆迁。

（6）应尽量避免通过果园等经济作物区或其他林木密集区。当无法避免时，应根据树木的自然生长高度按跨越设计。

（7）应尽量避让易燃易爆设施、不良地质地带和采动影响区等区域。当无法避让时，应采取必要的防护措施或相应技术手段，保证输电线路的安全运行。

（8）输电线路与其他线路交叉跨越（穿越）时，需要按规程规定保证足够的跨越（钻越）距离。输电线路跨越高速铁路、高速公路和重要输电通道的区段应采用独立耐张段。输电线路与铁路交叉角不应小于45°，且不宜在铁路车站出站信号机以内跨越；与高速公路交叉角一般不应小于 45°；与重要输电通道交叉角不宜小于45°。

（9）输电线路跨越河道时，应选择在河道相对狭窄、两岸地形较高、地质条件较好的地段通过。

第五节　通道设计原则

一、通道设计主要工作内容

（1）收集输电线路沿线规划、国土、矿产、林业、文物、军事、通信、交通、水利等与确定路径方案有关的资料，并取得相关协议。

（2）调查输电线路沿线树木的分布、种类、自然生长高度、数量，确定设计方案。

（3）调查输电线路沿线厂矿、企业等障碍设施的位置，确定避让或拆迁（封闭）方案，并协助建设单位取得拆迁（封闭）赔偿协议。

（4）落实环境影响、水土保持、地质灾害、压覆矿产、文物、地震安全、防洪评价等专项评估报告的批复意见。

（5）收集国家、地方与输电线路通道清理的相关政策，并遵照执行。

（6）列出影响输电线路安全运行的障碍物性质、数量及处理方法。

二、通道设计主要原则

1. 房屋拆迁

（1）输电线路通道内的房屋拆迁应依照 GB 50061—2010《66kV 及以下架空电力线路设计规范》、GB 50545—2010《110kV～750kV 架空输电线路设计规范》、GB 50665—2011《1000kV 架空输电线路设计规范》、GB 50790—2013《±800kV 直流架空输电线路设计规范》、DL 5497—2015《高压直流架空输电线路设计技术规程》执行。

（2）输电线路通道内的房屋拆迁应根据当地民房特点，考虑主辅房、阁楼、地下室、附属设施等具体情况，分区域制定处理原则。

（3）35～750kV 交流输电线路不应跨越屋顶为可燃材料的建筑物。对于耐火屋顶的建筑物，35～750kV 交流输电线路如需跨越时，除满足安全跨越距离要求，还应与有关方面协商同意。500kV 及以上交流输电线路及±400、±500、±660kV 直流输电线路不应跨越长期住人的建筑物。1000kV 架空输电线路、±800kV 直流架空输电线路不应跨越经常有人居住的建筑物及屋顶为燃烧材料危及线路安全的建筑物。

（4）在最大计算弧垂情况下，输电线路导线与建筑物之间的最小垂直距离应符合表 2-2、表 2-3 的规定。

表 2-2　　交流输电线路导线与建筑物之间的最小垂直距离

标称电压（kV）	35	66	110	220	330	500	750	1000
垂直距离（m）	4.0	5.0	5.0	6.0	7.0	9.0	11.5	15.5

表 2-3　　直流输电线路导线与建筑物之间的最小垂直距离

标称电压（kV）	±400	±500	±660	±800	±1100
垂直距离（m）	9.0	9.0	15.0	16.0	21.5

注　目前±400kV、±660kV、±1100kV 直流输电线路尚无规程、规范，本节中各表中数据系格尔木—拉萨±400kV 直流输电线路工程、宁东—山东±660kV 直流线路工程及准东—华东±1100kV 特高压直流输电线路工程实际值。

（5）在最大计算风偏情况下，输电线路边导线与建筑物之间的最小净空距离应符合表 2-4、表 2-5 的规定。

表 2-4　　交流输电线路边导线与建筑物之间的最小净空距离

标称电压（kV）	35	66	110	220	330	500	750	1000
净空距离（m）	—	—	4.0	5.0	6.0	8.5	11.0	15.0

表 2-5　　直流输电线路边导线与建筑物之间的最小净空距离

标称电压（kV）	±400	±500	±660	±800	±1100
净空距离（m）	8.5	8.5	14.5	15.5	21.0

（6）无风情况下，输电线路边导线与建筑物之间的水平距离应符合表 2-6、表 2-7 的规定。

表 2-6　　交流输电线路边导线与建筑物之间的水平距离

标称电压（kV）	35	66	110	220	330	500	750	1000
水平距离（m）	1.5	2.0	2.0	2.5	3.0	5.0	6.0	7.0

表 2-7　　直流输电线路边导线与建筑物之间的水平距离

标称电压（kV）	±400	±500	±660	±800	±1100
水平距离（m）	5.0	5.0	6.5	7.0	7.0

（7）500kV 及以上电压等级交流输电线路跨越非长期住人的建筑物或邻近民房时，房屋所在位置离地面 1.5m 处的未畸变电场强度不得超过 4kV/m。±400kV 及以上电压等级直流输电线路跨越非长期住人的建筑物或邻近民房时，在湿导线情况下房屋所在地面的未畸变合成电场强度不得超过 15kV/m。

（8）并行建设的输电线路应考虑相邻线路对地面场强的相互影响。对于线路之间的房屋应满足第（7）条的要求。

（9）输电线路的路径选择应尊重当地民俗，应尽量避免跨越寺庙等敏感设施。

（10）在输电线路工程环保验收时，对不满足环保验收要求的建筑物应予以处理。

2. 树木跨越及砍伐

（1）树木跨越。

1）输电线路在跨越成片林区时，原则上应采取高塔跨越设计方案。对跨越困难的树木应因地制宜采取修剪、更换树种或砍伐等方案。

2）应根据收资情况由建设、运维和设计单位共同确定线路沿线被跨越树木的自然生长高度，确保建设、验收和运行标准统一。

3）输电线路经过经济作物、集中林区采用高塔跨越方案时，应符合下列规定：

a）当跨越时，导线与自然生长高度的树木之间的最小垂直距离，应符合表 2-8、表 2-9 规定的数值。

表 2-8　　交流输电线路导线与树木之间（考虑自然生长高度）的最小垂直距离

标称电压（kV）	35	66	110	220	330	500	750	1000	
								单回路	同塔双回路（逆相序）
垂直距离（m）	4.0	4.0	4.0	4.5	5.5	7.0	8.5	14.0	13.0

表 2-9　　直流输电线路导线与树木之间（考虑自然生长高度）的最小垂直距离

标称电压（kV）	±400	±500	±660	±800	±1100
垂直距离（m）	7.0	7.0	10.5	13.5	17.5

b）在最大计算风偏情况下，输电线路通过公园、绿化区或防护林带，导线与树木之间的最小净空距离，应符合表 2-10、表 2-11 规定的数值。

表 2-10　　交流输电线路导线与树木之间的最小净空距离

标称电压（kV）	35	66	110	220	330	500	750	1000	
								单回路	同塔双回路（逆相序）
垂直距离（m）	3.5	3.5	3.5	4.0	5.0	7.0	8.5	10.0	10.0

表 2-11　　直流输电线路导线与树木之间的最小净空距离

标称电压（kV）	±400	±500	±660	±800	±1100
垂直距离（m）	7.0	7.0	10.5	10.5	14.0

c）输电线路通过果树、经济作物或城市灌木林不应砍伐出通道。导线与果树、经济作物、城市绿化灌木以及街道行道树之间的最小垂直距离，应符合表 2-12、表 2-13 规定的数值。

表 2-12　　交流输电线路导线与果树、经济作物、城市绿化灌木及街道行道树之间的最小垂直距离

标称电压（kV）	35	66	110	220	330	500	750	1000	
								单回路	同塔双回路（逆相序）
垂直距离（m）	3.0	3.0	3.0	3.5	4.5	7.0	8.5	16.0	15.0

表 2-13　　直流输电线路导线与果树、经济作物、城市绿化灌木及街道行道树之间的最小垂直距离

标称电压（kV）	±400	±500	±660	±800	±1100
垂直距离（m）	7.0	7.0	12.5	15.0	19.5

4）对成片竹林、未成片的树林、经济林、主要道路两旁的防护林以及房前屋后的风景林、零星树木，应根据综合技术经济比较结果，确定跨越或砍伐方案。

5）对于线路通道内零星保护树木、风水树、古树，应尊重当地风俗习惯，因地制宜，采取避让或高塔跨越等措施。

6）重冰区输电线路通过林区时，应按砍跨结合原则设计，尽量采取高塔跨越方案。

（2）树木砍伐。

1）局部难以跨越的树木应予以修剪或砍伐。树木的砍伐范围应按导线最大弧垂情况下与树木（考虑自然生长高度）之间的最小垂直距离以及在最大计算风偏情况下导线与树木（考虑自然生长高度）之间的允许最小净空距离确定。

2）当砍伐通道时，通道宽度应按 1）条的原则确定。通道附近超过主要树种自然生长高度的非主要树种树木应砍伐。

3. 爆破区域的安全距离

输电线路应尽量避让地面爆破作业场所、民用爆破器材工程、地下及覆土火药炸药仓库、烟花爆竹工程等影响线路安全运行的设施。若因线路走廊限制，与上述设施距离较近时，输电线路对上述设施最小安全距离应满足相关规范、规程的规定，详细要求可参见本章第六节一、爆破区域的安全距离有关规程、规范。在实际工程设计中，相关规范、规程未涉及的电压等级输电线路安全距离要听取相关爆破工程、炸药库等产权单位及主管部门的意见并签订协议，具体问题具体处理。

4. 危险品厂房（仓库）等的防火间距

输电线路应尽量远离危险品厂房（仓库）、汽车加油加气站、油气井、氧气站等影响线路安全运行的设施。若因线路走廊限制，对上述设施距离较近时，输电线路对上述设施防火间距或最近水平距离应满足相关规范、规程的规定，详见本章第六节二、危险品厂房（仓库）等的防火间距有关规程、规范。

5. 石油、天然气管道

石油、天然气管道分为特殊管道（地面上输送石油、天然气的管道）和埋地管道。线路塔位及接地体对石油、天然气管道的最小水平距离应满足相关规范、规程、标准的规定。工程设计中，输电线路与石油、天然气管道平行接近或交叉时，除执行相关规范、规程、标准外，还应注意与相关单位签订必要的协议并充分听取协议单位的意见。

（1）特殊管道。

1）特殊管道指架设在地面上输送易燃、易爆物品如石油、天然气的管道。交、直流输电线路对特殊管道的影响主要体现在线路事故倒塔影响管道和容性耦合影响在管道上产生静电两类，输电线路设计规范对输电线路与特殊管道平行接近和交叉距离进行了规定。

2）架空输电线路设计规范对输电线路特殊管道最小水平距离的规定见表 2-14。有关科研单位给出了 1000kV 架空输电线路与特殊管道的允许平行长度的建议值，见表 2-15。

表 2-14　架空输电线路与特殊管道的最小水平距离

标称电压（kV）	边导线至特殊管道任何部分的最小水平距离（m）	
	开阔地区	路径受限地区（在最大风偏情况下）
35～66	平行：最高杆（塔）高	4.0
110	平行：最高杆（塔）高	4.0
220	平行：最高杆（塔）高	5.0
330	平行：最高杆（塔）高	6.0
500	平行：最高杆（塔）高	7.5
750	平行：最高杆（塔）高	9.5（管道）、8.5（顶部）、11.0（底部）
1000	平行：最高杆（塔）高	13.0
±400	—	—
±500	平行：最高杆（塔）高	9.0
±660	平行：最高杆（塔）高	13.0
±800	平行：天然气、石油（非埋地管道）最高杆（塔）高+3m	15.0
	交叉：最高杆（塔）高	

注　架空输电线路与特殊管道平行、交叉时，特殊管道应接地。

表 2-15　1000kV 架空输电线路与特殊管道的允许平行长度　km

正常运行电流 3kA	1000kV 单回路	1000kV 双回路逆相序
管道石油沥青防护	1	3
普通 2 层 PE 防腐层	1	2

（2）埋地石油、天然气管道。交、直流输电线路对埋地输油输气管道的电磁影响从机理上可分为感性耦合影响、阻性耦合影响和容性耦合影响三类。交、直流输电线路对管道的电磁影响主要涉及对人身安全的影响、对管道安全的影响、对管道阴极保护设备的影响以及对管道的交、直流干扰等问题。应对交、直流输电线路对输油输气管道的电磁影响机理进行分析，结合相应规程、规范，给出了线路正常运行、雷

击及短路故障情况下，线路对人身安全、管道安全、管道阴极保护设备安全的电磁影响限值。交、直流线路与油气管道的安全距离需要依据对人身安全、管道安全、阴极保护设备的正常工作以及管道干扰的限值要求而确定，涉及线路、管道与阴极保护设备的具体情况，不能简单地用某个数值来限制输电线路与输油输气管道的距离，尤其是特高压交、直流线路，单纯是根据线路的电压等级来划分安全距离限值是不够全面合理的。目前，输电线路设计规范未对输电线路与埋地石油、天然气管道平行接近距离进行规定，特高压交、直流线路根据线路和管道的具体参数计算确定，详见 GB 50665—2011《1000kV 架空输电线路设计规范》、GB 50790—2013《±800kV 直流架空输电线路设计规范》。其他电压等级线路应满足相关规范、规程、标准的规定，详见本章第六节埋地石油、天然气管道有关规程、规范。

6. 城镇燃气埋地管道

输电线路应尽量远离城镇燃气埋地管道并尽量避免交叉，若因线路走廊限制，对城镇燃气埋地管道距离较近时，线路对城镇燃气埋地管道的净距及安全距离应满足相关规范、规程的规定，详见本章第六节城镇燃气埋地管道有关规程、规范，供设计人员参考使用。输电线路与城镇燃气埋地管道平行接近或交叉时，除执行相关规范、规程外，还应与相关单位签订必要的协议并充分听取协议单位的意见。

7. 低压电力线、弱电线路

（1）高电压等级线路与低压电力线、弱电线路平行接近在工程设计中是常见的。高电压等级线路与低压电力线、弱电线路平行接近时对附近线路产生影响的耦合方式有两种，即容性耦合和感性耦合。对于低压电力线，高电压等级线路正常运行时由容性耦合产生的感应电压、纵向感应电动势，故障（单相接地短路）时由感性耦合产生的纵电动势，其限值不应超过连接于低压电力线的用电设备的耐压水平，同时考虑感应电压对杆塔上检修人员的安全。对于弱电线路，高电压等级线路正常运行及故障（单相接地短路）时由感性耦合产生的纵电动势，正常运行时由容性耦合产生的感应电流，其限值以保证连接于弱电线路上的通信设备及人身安全为准。

（2）750kV 及以下交流输电线路、直流输电线路与低压电力线、弱电线路平行接近的最小水平距离按输电线路设计规范执行。根据中国电力科学研究院的研究成果，1000kV 特高压线路与低压电力线、弱电线路的水平接近时，感应电压与接近距离和平行长度有关，依据电磁感应限值无法得出一个通用的最小水平距离，所以必须根据工程具体情况计算确定。

（3）输电线路设计规范中架空输电线路与低压电力线平行接近的最小水平距离见表 2-16；架空输电线路与弱电线路平行接近的最小水平距离见表 2-17。由于目前±400、±660kV 直流输电线路尚无规程、规范，表 2-16、表 2-17 中数据参照了格尔木—拉萨±400kV 直流输电线路工程及宁东—山东±660kV 直流线路工程。GB 50665—2011《1000kV 架空输电线路设计规范》对 1000kV 架空输电线路平行接近低压电力线、弱电线路提出的注意事项如下：宜远离低压用电线路和通信线路，在路径受限制地区，与低压用电线路和通信线路的平行长度不宜大于 1500m，与边导线的水平距离宜大于 50m，必要时，通信线路应采取防护措施，受静电或电磁感应影响电压可能异常升高的入户低压线路应给予必要的处理。

表 2-16　　架空输电线路与低压电力线平行接近的最小水平距离

标称电压（kV）	与边导线平行，最小水平距离（m）		
	开阔地区	路径受限地区（杆塔同步排列，边导线间最小距离）	路径受限地区（杆塔交错排列，最大风偏情况下对相邻杆塔最小距离）
35～66	最高杆（塔）高	5.0	
110	最高杆（塔）高	5.0	3.0
220	最高杆（塔）高	7.0	4.0
330	最高杆（塔）高	9.0	5.0
500	最高杆（塔）高	13.0	7.0
750	最高杆（塔）高	16.0	9.5
1000		20	13.0
±400	最高杆（塔）高	13.0	7.0
±500	最高杆（塔）高	13.0	7.0
±660	最高杆（塔）高	18.0	10.0
±800	最高杆（塔）高	20	13.0

表 2-17 架空输电线路与弱电线路平行接近的最小水平距离

标称电压（kV）	与边导线平行，最小水平距离（m）		
	开阔地区	路径受限地区（杆塔同步排列，边导线间最小距离）	路径受限地区（杆塔交错排列最大风偏情况下对相邻杆塔最小距离）
35～66	最高杆（塔）高	4.0	
110	最高杆（塔）高	4.0	3.0
220	最高杆（塔）高	5.0	4.0
330	最高杆（塔）高	6.0	5.0
500	最高杆（塔）高	8.0	7.0
750	最高杆（塔）高	10.0	9.5
1000			单回路 13/双回路逆相序 12
±400	最高杆（塔）高	8.0	
±500	最高杆（塔）高	8.0	
±660	最高杆（塔）高	10.0	
±800	最高杆（塔）高	13.0	

8. 机场

输电线路距军用机场（含军民和用机场）、民用机场距离较近时，线路对军用机场净空和障碍物限制面等要求应满足有关文件及标准的要求，详见本章第六节机场净空和障碍物限制面有关文件及标准，供参考。

9. 无线台站及气象设施

输电线路应满足与无线台站的防护距离要求及气象设施和气象探测环境保护要求。输电线路与无线台站的防护间距要求见第十三章环境保护表 13-4、表 13-5、表 13-6 规定。输电线路与气象设施和气象探测环境保护要求详见本章第六节气象设施和气象探测环境保护条例，供参考。

第六节 通道设计相关规程、规范

一、爆破区域的安全距离有关规程、规范

1. 地面爆破作业场所

GB 6722—2014《爆破安全规程》规定：个别飞散物对人员的安全允许距离不应小于表 2-18 的规定；对设备或建（构）物的安全允许距离，应由设计（由安全生产监督局指定设计单位）确定。

表 2-18 爆破个别飞散物对人员的安全允许距离

爆破类型和方法		最小安全允许距离（m）
露天岩石爆破	裸露药包爆破法破大块	400
露天岩石爆破	浅孔爆破法破大块	300
露天岩石爆破	浅孔台阶爆破	200（复杂地质条件下或未形成台阶工作面时不小于 300）
露天岩石爆破	深孔台阶爆破	按设计，但不小于 200
露天岩石爆破	硐室爆破	按设计，但不小于 300

注 1. 表中当沿山坡爆破时，下坡方向的个别飞散物安全允许距离应增大 50%。

2. 国家电网有限公司有关文件及技术规定中对开山取石、施工爆破场所应避让距离给出了解释说明，也可供设计参考。国家电网有限公司《关于印发〈协调统一基建类和生产类标准差异条款〉的通知》（国网电科〔2011〕12 号）对开山取石、施工爆破场所应避让的距离："对有爆破作业的场所应予以避让，应根据爆破情况及与输电线路的关系合理确定安全距离，最小安全距离一般取 300m。在受限地区，经过专题爆破论证，其安全距离可以减小"。Q/GDW 166.1—2015《架空输电线路通道清理技术规定》有关采石场的说明："线路应尽量远离采石场，在开阔地区与采石场的距离宜不小于 400m。在线路通道较紧张地区，对有爆破作业的场所应予以避让，并根据爆破情况及与输电线路的关系合理确定安全距离，开采面距离线路最近距离不得小于 300m。在受限地区，经过相关论证，其安全距离可以适当减小。"

2. 民用爆破器材工程

GB 50089—2007《民用爆破器材工程设计安全规范》规定：

（1）危险品的危险等级规定如下：

1.1 级：危险品具有整体爆炸危险性。

1.2 级：危险品具有迸射破片的危险性，但无整体爆炸危险性。

1.3 级：危险品具有燃烧危险和较小爆炸或较小迸射危险，或两者兼有，但无整体爆炸危险性。

1.4 级：危险品无重大危险性，但不排除某些危险品在外界强力引燃、引爆条件下的燃烧爆炸危险作用。

（2）危险品生产区 1.1 级建筑物的外部距离见表 2-19；危险品生产区内，1.2 级建筑物的外部距离不应小于表 2-19 的规定；危险品生产区内，1.4 级建筑物的外部距离不应小于 50m，硝酸铵仓库的外部距离不应小于 200m。

（3）危险品总仓库区 1.1 级建筑物的外部距离见表 2-20；1.4 级建筑物的外部距离不应小于 100m，硝酸铵仓库的外部距离不应小于 200m。

表 2-19　　危险品生产区 1.1 级建筑物的外部距离　　m

序号	输电线路标称电压（kV）	单个建筑物计算药量（kg）										
		20000	18000	16000	14000	12000	10000	9000	8000	7000	6000	5000
		外部允许距离										
1	35	260	250	240	230	220	210	200	190	180	170	160
2	110	440	420	410	390	370	350	340	320	310	290	280
3	220	830	800	770	730	700	660	630	610	580	550	520
4	220 以上	1040	1010	970	940	880	830	810	770	740	700	670
序号	输电线路标称电压（kV）	单个建筑物计算药量（kg）										
		4000	3000	2000	1000	500	300	200	100	50	30	10
		外部允许距离										
1	35	150	140	120	100	90	80	70	60	55	50	45
2	110	260	230	200	170	150	130	120	100	80	70	60
3	220	480	440	390	310	250	220	200	180	160	140	120
4	220 以上	610	560	490	400	350	320	300	280	250	230	200

注 1. 外部距离应自危险性建筑物的外墙面算起。
2. 计算药量为中间值时，外部距离采用线性插入法确定。
3. 表中外部距离适用于平坦地形，遇有利地形可适当折减，遇不利地形宜适当增加。
4. 有关地形利用的条件及增减值：
（1）当危险性建筑物紧靠山脚布置，其与山背后建筑物之间的外部距离调整应符合下列规定：
1）计算药量小于 20t，山高大于 20m，山的坡度大于 15°时，可减少 25%～30%。
2）计算药量在 20～50t，山高大于 30m，山的坡度大于 25°时，可减少 20%～25%。
3）计算药量大于 50t，山高大于 50m，山的坡度大于 30°时，可减少 15%～20%。
（2）在一条山沟中，对两侧山高为 30～60m，坡度 20°～30°，沟宽 40～100m，纵坡 4%～10%时，沿沟纵深和出口方向布置的建筑物之间的内部最小允许距离，与平坦地形相比，应适当增加 10%～40%；对有可能沿山坡脚下直对布置的两建筑物之间的最小允许距离，与平坦地形相比，应增加 10%～50%。

表 2-20　　危险品总仓库区 1.1 级建筑物的外部距离　　m

序号	输电线路标称电压（kV）	单个建筑物计算药量（kg）										
		200000	180000	160000	140000	120000	100000	90000	80000	70000	60000	50000
		外部允许距离（m）										
1	35	500	490	470	450	420	400	390	370	360	340	320
2	110	830	800	770	740	700	660	640	620	590	560	530
3	220	1470	1420	1360	1300	1240	1160	1120	1080	1030	980	920
4	220 以上	2000	1930	1850	1760	1680	1580	1530	1480	1400	1330	1260

续表

序号	输电线路标称电压（kV）	单个建筑物计算药量（kg）										
		45000	40000	35000	30000	25000	20000	18000	16000	14000	12000	10000
		外部允许距离（m）										
1	35	310	300	280	270	250	240	230	220	210	200	190
2	110	500	490	470	440	410	390	380	360	350	320	310
3	220	900	860	820	780	740	680	660	630	610	580	540
4	220 以上	1210	1170	1120	1060	990	940	900	860	830	770	740

序号	输电线路标称电压（kV）	单个建筑物计算药量（kg）									
		9000	8000	7000	6000	5000	2000	1000	500	300	100
		外部允许距离（m）									
1	35	180	170	160	150	140	110	90	80	70	60
2	110	300	290	270	260	250	190	160	140	110	90
3	220	520	500	480	460	430	320	250	220	190	170
4	220 以上	720	680	650	630	590	430	380	310	290	280

注 同表 2-19。

（4）建筑物的危险等级划分如下：

建筑物危险等级主要指建筑物内所含有的危险品危险等级及生产工序的危险等级，分为 1.1（含 1.1*），1.2，1.4 级。民用爆破器材尚无 1.3 级危险品，不设对应的 1.3 级建筑物危险等级。1.1*是特指生产无雷管感度炸药、硝铵膨化工序及在抗爆间室中进行的炸药准备、药柱压制、导爆索制索等建筑物危险等级。

生产、加工、研制危险品的建筑物危险等级应符合表 2-21 的规定，贮存危险品的建筑物危险等级应符合表 2-22 的规定。

表 2-21　生产、加工、研制危险品的建筑物危险等级

序号	危险品名称	危险等级	生产加工工序	技术要求或说明
工业炸药				
1	铵梯（油）类炸药	1.1	梯恩梯粉碎、梯恩梯称量、混药、筛药、凉药、装药、包装	—
		1.4	硝酸铵粉碎、干燥	—
		1.4	废水处理	—
2	粉末铵油炸药、铵松蜡炸药、铵沥蜡炸药	1.1	混药、筛药、凉药、装药、包装	—
		1.1*	混药、筛药、凉药、装药、包装	无雷管感度炸药，且厂房内计算药量不大于 5t
		1.4	硝酸铵粉碎、干燥	—
3	多孔粒状铵油炸药	1.1*	混药、包装	无雷管感度炸药，且厂房内计算药量不大于 5t
4	膨化硝铵炸药	1.1*	膨化	无雷管感度炸药，且厂房内计算药量不大于 5t
		1.1	混药、筛药、凉药、装药、包装	—
5	粒状黏性炸药	1.1*	混药、包装	无雷管感度炸药，且厂房内计算药量不大于 5t
		1.4	硝酸铵粉碎、干燥	—

续表

序号	危险品名称	危险等级	生产加工工序	技术要求或说明
6	水胶炸药	1.1	硝酸甲胺制造和浓缩、混药、凉药、装药、包装	—
		1.4	硝酸铵粉碎、筛选	—
7	浆状炸药	1.1	梯恩梯粉碎、炸药溶药混药、凉药、包装	—
		1.4	梯恩梯粉碎	—
8	胶状、粉状乳化炸药	1.1	乳化、乳胶基质冷却、乳胶基质贮存、敏化（制粉）、敏化后的保温（凉药）、贮存装药、包装	—
		1.4	硝酸铵粉碎、硝酸钠粉碎	—
9	黑梯药柱（柱装）	1.1	熔药、装药、凉药、检测、包装	—
10	梯恩梯药柱（压制）	1.1*	压制	应在抗爆间室内进行
			检测、包装	—
11	太乳炸药	1.1	制片、干燥、检测、包装	—
工业雷管				
12	火雷管、电雷管、导爆管雷管、继爆管	1.1	黑索金或太安的造粒、干燥、筛选、包装	—
			火雷管干燥、烘干	—
		1.1*	继爆管的装配、包装	—
		1.2	二硝基重氮酚制造（中和、还原、重氮、过滤）	二硝基重氮酚应为湿药
			二硝基重氮粉的干燥、凉药、筛选、黑索金或太安的制造、干燥、筛选	应在抗爆间内进行
			火雷管装药、压药	应在抗爆间内进行
			电雷管、导爆管雷管装配、雷管编码	应在钢板防护下进行
			雷管检验、包装、装箱	应在钢板防护下进行
			雷管试验站	—
			引火药头用和延期药用的引火药剂制造	—
		1.4	引火元件制造	—
			延期药混合、造粒、干燥、筛选、装药	按工艺要求可设抗爆间或钢板防护
			延期元件制造	—
			二硝基重氮酚	—
工业索类火工品				
13	导火索	1.1	黑火药三成分湿药、干燥、筛选、包装	—
			导火索制造中的黑火药准备	—
		1.4	导火索制索、盘索、烘干、普检、包装	—
			硝酸钾干燥、粉碎	—
14	导爆索	1.1	炸药的筛选、混合、干燥	—
			导爆索包塑、涂索、烘索、盘索、普检、组批、包装	当包塑等在抗暴间室内进行，可按 1.1*级处理
		1.1*	炸药的筛选、混合、干燥	应在抗爆间室内进行
			导爆索制索	应在抗爆间室内进行
		1.2	导爆索性能测试	—

续表

序号	危险品名称	危险等级	生产加工工序	技术要求或说明
15	塑料导爆管	1.2	炸药的粉碎、干燥、筛选、混合	应在抗爆间室或钢板防护下进行
		1.4	塑料导爆管制造	按工艺要求，导爆管挤出处可设防护
16	爆裂管	1.1	爆裂管的切管、包装	—
		1.2	爆裂管的装药	应在抗爆间室内进行
油气井用起爆器材				
17	射孔弹、穿孔弹	1.1	炸药准备（筛选、烘干等）	—
		1.2	炸药暂存、保温、压药	应在抗爆间室内进行
			装配、包装	宜在钢板防护下进行
			试验室	可用试验塔
地震勘探用爆破器材				
18	高爆速	1.1	炸药准备、熔混药、装药、压药、凉药、装配、检验、装箱	—
	中爆速	1.1	炸药准备、震源药柱检验、装药	—
			装药、压药	—
			钻孔	—
			装传药药柱	—
	低爆速	1.1	炸药准备、装药、装传爆药柱、检验、装箱	—
	黑火药、炸药、起爆药	1.4	理化实验室	单间计算药量不宜超过600g
		—	理化实验室	药量不大于300g，单间计算药量不超过20g，可为防火甲级

注 雷管制造中所用药剂（单组分或多组分药剂），其作用和起爆药类似者，此类药剂的危险等级应按表内二硝基重氮酚确定。

表 2-22　　贮存危险品的建筑物危险等级

序号	危险品名称	危险等级	
		中转库	总仓库
1	黑索金、太安、奥克托今、梯恩梯、苦味酸、黑梯药柱（注装）、梯恩梯药柱（压制）、太乳炸药 铁梯（油）类炸药、粉状铵油炸药、铁松蜡炸药、铵沥蜡炸药、多孔粒状住油炸药、膨化硝铵炸药、粒状黏性炸药、水胶炸药、浆状炸药、胶状和粉状乳化炸药、黑火药	1.1	1.1
2	起爆药	1.1	—
3	雷管（火雷管、电雷管、导爆管雷管、继爆管）	1.1	1.1
4	爆裂管	1.1	1.1
5	导爆索、射孔（穿孔）弹、震源药柱	1.1	1.1
6	延期药	1.4	—
7	导火索	1.4	1.4
8	硝酸铵、硝酸钠、硝酸钾、氯酸钾、高氯酸钾	1.4	1.4

3. 地下及覆土火药炸药仓库

GB 50154—2009《地下及覆土火药炸药仓库设计安全规范》规定：

（1）缓坡型岩石洞库，按爆炸飞石、爆炸空气冲击波对输电线路外部允许距离中的最大值确定。陡坡型岩石洞库和黄土洞库，按爆炸空气冲击波对输电线

路外部允许距离中的最大值确定。覆土库按爆炸空气冲击波对输电线路外部允许距离确定。

（2）缓坡地形岩石洞库爆炸飞石外部允许距离见表2-23；被保护对象偏离洞轴线时爆炸飞石外部允许距离的折减系数见表2-24；各类岩洞库爆炸飞石外部允许距离的折减系数见表2-25。缓坡地形岩石洞库爆炸飞石实际外部允许距离应取表2-23的相应数值后，乘以表2-24和表2-25相应的折减系数确定。缓坡地形极硬岩石和硬岩石洞库爆炸空气冲击波外部允许距离见表2-26；缓坡地形极硬岩石和硬岩石洞库被保护对象偏离洞轴线时爆炸空气冲击波外部允许距离的折减系数见表2-27；缓坡地形极硬岩石和硬岩石洞库爆炸空气冲击波实际外部允许距离应取表2-26的相应数值后，乘以表2-27相应的折减系数确定。缓坡地形软岩石洞库爆炸空气冲击波外部允许距离见表2-28；缓坡地形软质岩石洞库被保护对象偏离洞轴线时爆炸空气冲击波外部允许距离的折减系数见表2-29；缓坡地形软质岩石洞库爆炸空气冲击波实际外部允许距离应取表2-28的相应数值后，乘以表2-29相应的折减系数确定。

（3）陡坡地形软质岩石洞库爆炸空气冲击波外部允许距离见表2-30；陡坡地形软质岩石洞库被保护对象偏离洞轴线时爆炸空气冲击波实际外部允许距离的折减系数见表2-31；陡坡地形软质岩石洞库爆炸空气冲击波实际外部允许距离取表2-30的相应数值后，乘以表2-31相应的折减系数确定。

（4）黄土洞库爆炸空气冲击波外部允许距离见表2-32；黄土洞库被保护对象偏离洞轴线时爆炸空气冲击波外部允许距离的折减系数见表2-33；黄土洞库爆炸空气冲击波实际外部允许距离取表2-32的相应数值后，乘以表2-33相应的折减系数确定。

（5）覆土库爆炸空气冲击波外部允许距离见表2-34。

（6）火药、炸药仓库的定义如下：

1）地下火药、炸药仓库，是由山体表面向山体内水平掘进的用于储存火药、炸药的洞室。主要由引洞、主洞室组成，部分包括排风竖井、进风地沟，简称洞库。

2）覆土火药、炸药仓库。分两种形式，一种是仓库后侧长边紧贴山丘，顶部覆土，在前侧长边覆土至顶部，两侧山墙为仓库出入口及装卸站台；另一种是其顶部覆土至仓库两侧及背后，前墙设有仓库出入口及装卸站台，简称覆土库。

表2-23　　缓坡地形岩石洞库爆炸飞石外部允许距离

装药等效直径（m）	1.40	1.76	2.01	2.22	2.39	3.01	3.44	3.79	4.08	4.34	4.57	4.78	4.97	5.14
存药量（t）	10	20	30	40	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
被保护对象	外部允许距离（m）													
35kV输电线路	270	350	400	450	480	620	710	790	850	910	960	1000	1050	1100
110kV输电线路	480	620	710	780	850	1080	1250	1390	1490	1600	1690	1760	1840	1930
220kV输电线路	740	950	1100	1210	1310	1670	1930	2140	2300	2480	2630	2740	2860	2990
330kV输电线路	780	1010	1160	1270	1390	1770	2030	2260	2430	2620	2770	2890	3020	3150
500kV输电线路	820	1060	1220	1340	1460	1860	2140	2380	2560	2760	2920	3040	3180	3320
750kV输电线路	860	1110	1280	1400	1530	1950	2250	2500	2690	2900	3070	3190	3340	3490

注　1. 表中存药量指梯恩梯当量，当为其他火药应按当量值换算。
2. 当洞库存药条件中横截面积比小于0.23时，其外部允许距离应按表中距离乘以0.85。
3. 采取表中距离时，应以装药等效直径为依据确定。当装药等效直径已定，实际存药量小于或等于表中相应存药量时，可直接采用表中距离；实际存药量大于表中存药量并不超过1倍时，应按表中距离乘以1.30。
4. 实际为等效装药直径中间值时，其相应存药量和外部允许距离应采用线性插入法确定。
5. 表中距离指水平投影距离，由洞口的中心算起。

表2-24　　被保护对象偏离洞轴线时爆炸飞石外部允许距离的折减系数

被保护对象偏离洞轴线角度 θ	折减系数
$0° \leq \theta \leq 50°$	1.00
$50° < \theta \leq 60°$	0.70
$60° < \theta \leq 70°$	0.60
$70° < \theta \leq 80°$	0.50
$80° < \theta \leq 90°$	0.40

注　当被保护对象偏离洞轴线90°时，不执行爆炸飞石外部允许距离。

表 2-25 各类岩洞库爆炸飞石外部允许距离的折减系数

岩石类别	抗压强度（kPa）	代表性岩石	折减系数
极硬岩	＞60000	花岗岩、玄武岩、安山岩、闪长岩等	1.0
硬质岩	30000～60000	钙质胶结的砾岩、砂岩、灰岩等	0.8
软质岩	5000～30000	泥质胶结的砾岩、页岩、泥灰岩等	0.7

表 2-26 缓坡地形极硬岩石和硬岩石洞库爆炸空气冲击波外部允许距离 m

装药等效直径（m）		1.40	1.76	2.01	2.22	2.39	3.01	3.44	3.79	4.08	4.34	4.57	4.78	4.97	5.14
存药量（t）		10	20	30	40	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
被保护对象	35kV 输电线路	65	85	95	105	115	140	160	180	190	200	220	225	230	240
	110kV 输电线路	85	105	120	135	145	180	210	230	250	260	270	290	300	310
	220kV 输电线路	300	280	430	480	510	650	740	810	880	940	970	1030	1060	1100
	330kV 输电线路	310	400	460	500	540	680	780	860	930	990	1030	1080	1120	1160
	500kV 及以上输电线路	330	420	480	530	570	720	820	900	980	1040	1080	1140	1180	1220

注 1. 表中存药量指梯恩梯当量，当为其他火药应按当量值换算。
2. 当洞库存药条件中横截面积比小于 0.23 时，其外部允许距离应按表中距离乘以 0.85。
3. 采取表中距离时，应以装药等效直径为依据确定。当装药等效直径已定，实际存药量小于或等于表中相应存药量时，可直接采用表中距离；实际存药量大于表中存药量并不超过 1 倍时，应按表中距离乘以 1.30。
4. 实际为等效装药直径中间值时，其相应存药量和外部允许距离应采用线性插入法确定。
5. 表中距离指水平投影距离，由洞口的中心算起。

表 2-27 缓坡地形极硬岩石和硬岩石洞库被保护对象偏离洞轴线时爆炸空气冲击波外部允许距离的折减系数

被保护对象偏离洞轴线角度 θ	折减系数
$0° \leq \theta \leq 15°$	1.00
$15° < \theta \leq 30°$	0.87
$30° < \theta \leq 45°$	0.71
$45° < \theta \leq 60°$	0.63
$60° < \theta \leq 90°$	0.56

注 当被保护对象偏离洞轴线 90°时，不执行爆炸飞石外部允许距离。

表 2-28 缓坡地形软质岩石洞库爆炸空气冲击波外部允许距离 m

装药等效直径（m）		1.40	1.76	2.01	2.22	2.39	3.01	3.44	3.79	4.08	4.34	4.57	4.78	4.97	5.14
存药量（t）		10	20	30	40	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
被保护对象	35kV 输电线路	80	100	115	125	135	170	195	215	230	245	260	270	280	290
	110kV 输电线路	110	135	155	170	180	230	260	290	310	330	350	360	370	390
	220kV 输电线路	440	560	630	700	760	950	1080	1190	1290	1370	1440	1510	1570	1620
	330kV 输电线路	470	590	670	740	800	1000	1140	1250	1360	1440	1520	1600	1650	1700
	500kV 输电线路	490	620	700	780	840	1050	1200	1320	1430	1520	1600	1680	1740	1800
	750kV 输电线路	515	650	740	820	880	1110	1270	1400	1500	1600	1700	1760	1840	1900

注 1. 表中存药量指梯恩梯当量，当为其他火药应按当量值换算。
2. 当洞库存药条件中横截面积比小于 0.23 时，其外部允许距离应按表中距离乘以 0.85。
3. 采取表中距离时，应以装药等效直径为依据确定。当装药等效直径已定，实际存药量小于或等于表中相应存药量时，可直接采用表中距离；实际存药量大于表中存药量并不超过 1 倍时，应按表中距离乘以 1.30。
4. 实际为等效装药直径中间值时，其相应存药量和外部允许距离应采用线性插入法确定。
5. 表中距离指水平投影距离，由洞口的中心算起。

表 2-29　缓坡地形软质岩石洞库被保护对象偏离洞轴线时爆炸空气冲击波外部允许距离的折减系数

被保护对象偏离洞轴线角度 θ	折减系数
$0° \leqslant \theta \leqslant 15°$	1.00
$15° < \theta \leqslant 30°$	0.94
$30° < \theta \leqslant 45°$	0.90
$45° < \theta \leqslant 60°$	0.84
$60° < \theta \leqslant 90°$	0.65

注　当被保护对象偏离洞轴线 90°时，不执行爆炸飞石外部允许距离。

表 2-30　陡坡地形软质岩石洞库爆炸空气冲击波外部允许距离

装药等效直径（m）	1.40	1.76	2.01	2.22	2.39	3.01	3.44	3.79	4.08	4.34	4.57	4.78	4.97	5.14
存药量（t）	10	20	30	40	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
被保护对象	外部允许距离（m）													
35kV 输电线路	110	140	160	180	190	240	280	310	330	350	370	385	400	420
110kV 输电线路	155	195	220	250	265	335	380	420	450	480	510	530	550	570
220kV 输电线路	720	910	1050	1160	1240	1560	1790	1960	2110	2240	2380	2470	2580	2660
330kV 输电线路	760	960	1100	1220	1300	1640	1880	2060	2220	2360	2500	2600	2720	2800
500kV 输电线路	800	1010	1160	1280	1370	1720	1970	2160	2330	2480	2630	2730	2860	2940
750kV 输电线路	840	1050	1200	1330	1430	1800	2060	2270	2440	2600	2730	2860	2970	3080

注　1. 表中存药量指梯恩梯当量，当为其他火药应按当量值换算。
2. 当洞库存药条件中横截面积比小于 0.23 时，其外部允许距离应按表中距离乘以 0.85。
3. 采取表中距离时，应以装药等效直径为依据确定。当装药等效直径已定，实际存药量小于或等于表中相应存药量时，可直接采用表中距离；实际存药量大于表中存药量并不超过 1 倍时，应按表中距离乘以 1.30。
4. 实际为等效装药直径中间值时，其相应存药量和外部允许距离应采用线性插入法确定。
5. 表中距离指水平投影距离，由洞口的中心算起。

表 2-31　陡坡地形软质岩石洞库被保护对象偏离洞轴线时爆炸空气冲击波外部允许距离的折减系数

被保护对象偏离洞轴线角度 θ	折减系数
$0° \leqslant \theta \leqslant 15°$	1.00
$15° < \theta \leqslant 30°$	0.90
$30° < \theta \leqslant 45°$	0.85
$45° < \theta \leqslant 60°$	0.65
$60° < \theta \leqslant 90°$	0.52

注　当被保护对象偏离洞轴线 90°时，不执行爆炸飞石外部允许距离。

表 2-32 黄土洞库爆炸空气冲击波外部允许距离

装药等效直径（m）	1.28	1.60	1.82	2.00	2.14	2.68	3.05	3.34	3.59	3.83
存药量（t）	10	20	30	40	50	100	150	200	250	300
被保护对象	外部允许距离（m）									
35kV 输电线路	40	50	55	60	65	80	95	105	110	120
110kV 输电线路	50	60	70	75	80	100	120	130	140	150
220kV 输电线路	160	200	230	250	270	340	390	430	470	490
330kV 输电线路	170	210	250	270	285	360	420	460	490	510
500kV 级以上输电线路	180	220	260	280	300	380	440	480	520	540

注 1. 表中存药量指梯恩梯当量，当为其他火药应按当量值换算。
2. 当洞库存药条件中横截面积比小于 0.23 时，其外部允许距离应按表中距离乘以 0.85。
3. 采取表中距离时，应以装药等效直径为依据确定。当装药等效直径已定，实际存药量小于或等于表中相应存药量时，可直接采用表中距离；实际存药量大于表中存药量并不超过 1 倍时，应按表中距离乘以 1.30。
4. 实际为等效装药直径中间值时，其相应存药量和外部允许距离应采用线性插入法确定。
5. 表中距离指水平投影距离，由洞口的中心算起。

表 2-33 黄土洞库被保护对象偏离洞轴线时爆炸空气冲击波外部允许距离的折减系数

被保护对象偏离洞轴线角度 θ	折减系数
$0° \leqslant \theta \leqslant 15°$	1.00
$15° < \theta \leqslant 30°$	0.94
$30° < \theta \leqslant 45°$	0.91
$45° < \theta \leqslant 60°$	0.86
$60° < \theta \leqslant 90°$	0.80

注 当被保护对象偏离洞轴线 90°时，不执行爆炸飞石外部允许距离。

表 2-34 覆土库爆炸空气冲击波外部允许距离

存药量（t）	10	20	30	40	50	100	150	200
被保护对象	外部允许距离（m）							
35kV 输电线路	120	150	175	190	210	260	300	330
110kV 输电线路	160	200	230	250	270	340	390	430
220kV 输电线路	630	790	900	990	1060	1350	1550	1690
330kV 输电线路	665	840	950	1050	1120	1430	1640	1790
500kV 级以上输电线路	700	800	1010	1110	1200	1510	1730	1900

注 1. 表中存药量指梯恩梯当量，当为其他火药应按当量值换算。
2. 存药量为中间值时，其外部允许距离应采用线性插入法确定。
3. 表中距离指水平投影距离，由建筑物外墙算起。

4. 烟花爆竹工程

GB 50161—2009《烟花爆竹工程设计安全规范》规定：

（1）危险品生产区 1.1 级建筑物、构筑物的外部最小允许距离见表 2-35；危险品生产区 1.3 级建筑物、构筑物的外部最小允许距离见表 2-36。

（2）危险品总仓库区 1.1 级仓库的外部最小允许距离见表 2-37；危险品总仓库区 1.3 级仓库的外部最小允许距离见表 2-38。

（3）外部最小允许距离应自危险性建筑物的外墙算起。

（4）若将总仓库区和生产区相邻或相连时，两者之间距离应按照各自外部最小允许距离要求计算，取大值。

（5）烟花爆竹危险品生产工序的建筑物的危险等级分类如下：

1）危险性建筑物的危险等级，应按下列规定划分为 1.1、1.3 级。

1.1 级建筑物为建筑物内的危险品在制造、储存、运输中具有整体爆炸危险或有迸射危险，其破坏效应将波及周围。根据破坏能力划分为 1.1^{-1}、1.1^{-2} 级。

1.1⁻¹级建筑物为建筑物内的危险品发生爆炸事故时，其破坏能力相当于TNT的厂房和仓库；

1.1⁻²级建筑物为建筑物内的危险品发生爆炸事故时，其破坏能力相当于黑火药的厂房和仓库。

1.3级建筑物为建筑物内的危险品在制造、储存、运输中具有燃烧危险，偶尔有较小爆炸或较小迸射危险，或两者兼有，但无整体爆炸危险，其破坏效应局限于本建筑物内，对周围建筑物影响较小。

2）厂房的危险等级应由其中最危险的生产工序确定。仓库的危险等级应由其中所储存最危险的物品确定。

3）危险品生产工序的危险等级分类应符合表2-39的规定。危险品仓库的危险等级分类应符合表2-40的规定。

表2-35　危险品生产区1.1级建筑物、构筑物的外部最小允许距离

存药量 m（kg）	$m\leqslant10$	$10<m\leqslant20$	$20<m\leqslant30$	$30<m\leqslant50$	$50<m\leqslant100$	$100<m\leqslant200$	$200<m\leqslant300$	$300<m\leqslant500$	$500<m\leqslant800$	$800<m\leqslant1000$
被保护对象	外部最小允许距离（m）									
35kV输电线路	35	35	40	50	60	80	90	110	130	140
110kV输电线路	50	60	65	70	80	110	120	140	170	190
220kV输电线路	60	70	80	100	120	160	180	210	250	270
220kV以上输电线路	110	130	150	180	220	290	330	370	450	490

表2-36　危险品生产区1.3级建筑物、构筑物的外部最小允许距离

存药量 m（kg）	$m\leqslant100$	$100<m\leqslant200$	$200<m\leqslant400$	$400<m\leqslant600$	$600<m\leqslant800$	$800<m\leqslant1000$
被保护对象	外部最小允许距离（m）					
35kV输电线路	35	35	35	35	35	35
110kV输电线路	35	35	35	35	35	35
220kV输电线路	40	42	44	46	48	50
220kV以上输电线路	60	65	70	75	80	90

表2-37　危险品总仓库区1.1级仓库的外部最小允许距离

存药量 m（kg）	$m\leqslant500$	$500<m\leqslant1000$	$1000<m\leqslant2000$	$2000<m\leqslant3000$	$3000<m\leqslant4000$	$4000<m\leqslant5000$	$5000<m\leqslant6000$	$6000<m\leqslant7000$	$7000<m\leqslant8000$	$8000<m\leqslant9000$	$9000<m\leqslant10000$
被保护对象	外部最小允许距离（m）										
35kV输电线路	80	90	110	120	130	140	150	160	170	180	190
110kV输电线路	115	145	185	210	230	250	260	275	290	300	310
220kV输电线路	175	220	28	320	350	380	400	420	440	460	480
220kV以上输电线路	315	400	510	580	630	690	720	760	800	830	860

表2-38　危险品生产区1.3级建筑物、构筑物的外部最小允许距离

存药量 m（kg）	$m\leqslant500$	$500<m\leqslant2000$	$2000<m\leqslant3000$	$3000<m\leqslant4000$	$4000<m\leqslant5000$	$5000<m\leqslant6000$	$6000<m\leqslant7000$	$7000<m\leqslant8000$	$8000<m\leqslant9000$	$9000<m\leqslant10000$	$10000<m\leqslant20000$
被保护对象	外部最小允许距离（m）										
35kV输电线路	35	35	38	40	43	45	48	50	53	55	70
110kV输电线路	35	40	45	48	50	55	57	60	65	78	85
220kV输电线路	40	65	75	80	85	90	95	100	105	110	140
220kV以上输电线路	70	100	120	130	140	150	160	170	180	190	250

表 2-39 危险品生产工序的危险等级分类

序号	危险品名称	危险等级	生产工序
1	黑火药	1.1^{-2}	药物混合（硝酸钾与碳、硫球磨），潮药装模（或潮药包片），压药、拆模（撕片），碎片，造粒，抛光，浆药，干燥，散热筛选，计量包装
		1.3	单料粉碎，筛选，干燥，称料，硫、碳二成分混合
2	烟火药	1.1^{-1}	药物混合，造粒，筛选，制开球药，压药，浆药，散热，计量包装
		1.1^{-2}	褙药柱（药块），湿药调剂，烟雾剂干燥，散热，计量包装
		1.3	氧化剂，可燃物的粉碎与筛选，称料（单料）
3	引火药	1.1^{-2}	制印，浆引，漆引，干燥，散热，绕引，定型裁割，捆扎，切引，包装
4	爆竹类	1.1^{-1}	装药
		1.1^{-2}	黑火药装药
		1.3	插引（含机械插引、手工插引和空桶插引），挤引，封口，点药，结鞭，包装
5	组合烟花类、内筒型小礼花类	1.1^{-1}	装药，筑（压）药，内筒封口（压纸片、装封口剂）
		1.1^{-2}	装发射药，黑火药装(压)药，已装药部件钻孔，装单个裸药件，单筒药量 ≥ 25g 非裸药件组装、外筒封口（压制片）
		1.3	蘸药，安引，组盆串引（空筒），单筒药量<25g 非裸药件组装，包装
6	礼花弹类	1.1^{-1}	装药
		1.1^{-2}	包药，组装（含安引、装发射药包、串球），剖引（引线钻孔），球干燥，散热，包装
		1.3	空壳安引，糊球
7	吐珠类	1.1^{-1}	装（筑）药
		1.3	安引（空筒），组装，包装
8	升空类（含双响炮）	1.1^{-1}	装药，筑（压）药
		1.1^{-2}	黑火药装（筑、压）药，包药，装裸药效果件（含效果药包），单个药量≥30g 非裸药件组装
		1.3	安引，单个药量<30g 非裸药件组装（含安稳定杆），包装
9	旋转类(旋转升空类)	1.1^{-1}	装药，筑（压）药
		1.1^{-2}	黑火药装，筑（压）药，已装药部件钻孔
		1.3	安引，组装（含引线、配件、旋转轴、架），包装
10	喷花类和架子烟花	1.1^{-1}	装药，筑（压）药，已装药部件钻孔
		1.3	安引，组装，包装
11	线香类	1.1^{-1}	装药
		1.3	粘药，干燥，散热，包装
12	摩擦类	1.1^{-1}	雷酸银药物配制，伴药砂，发令纸干燥
		1.1^{-2}	机械蘸药
		1.3	包药砂，手工蘸药，分装，包装
13	烟雾类	1.1^{-1}	装药，筑（压）药
		1.3	糊球，安引，球干燥，散热，组装，包装
14	造型玩具类	1.1^{-1}	装药，筑（压）药
		1.1^{-2}	已装药部件钻孔
		1.3	安引，组装，包装
15	电点火头	1.3	蘸药，干燥（晾干），检测，包装

注 表中未列品种、加工工序，其危险等级可依据第（5）条烟花爆竹危险品生产工序的建筑物的危险等级并对照本表确定。

表 2-40　　危险品仓库的危险等级分类

贮存的危险品名称	危险等级
烟火药（包括裸药效果件），开球药	1.1⁻¹
黑火药，引火线，未封口含药半成品，单个装药量在 40g 及以上已封口的烟花半成品及含爆炸音剂、笛音剂的半成品，已封口的 B 级爆竹半成品，A、B 级成品（喷花类除外）、单筒药量 25g 及以上的 C 级组合烟花类成品	1.1⁻²
电点火头，单个装药量在 40g 以下已封口的烟花半成品（不含爆炸音剂、笛音剂），已封口的 C 级爆竹半成品，C、D 级成品（其中，组合烟花类成品单筒药量在 25g 以下），喷花类成品	1.3

二、危险品厂房（仓库）等的防火间距有关规程、规范

1. 危险品厂房（仓库）

（1）GB 50545—2010《110kV～750kV 架空输电线路设计规范》、GB 50665—2011《1000kV 架空输电线路设计规范》、GB 50790—2013《±800kV 直流架空输电线路设计规范》规定：输电线路与甲类火灾危险性的生产厂房、甲类物品库房、易燃易爆材料堆场以及可燃或易燃易爆液（气）体储罐的防火间距，不应小于杆塔全高加 3m，还应符合其他的相关要求。该规范条文说明解释如下：以上规定，均是针对输电线路事故时，不致危及接近的易燃易爆场所。但在输电线路设计中，往往还要考虑易燃易爆物事故时，不危及线路的安全运行。如果有此需要，可参照相关专业规范或与有关单位协商解决。

（2）GB 50016—2014《建筑设计防火规范》规定：架空电力线与甲、乙类厂房（仓库），可燃材料堆垛，甲、乙、丙类液体储罐，液化石油气储罐，可燃、助燃气体储罐的最近水平距离应符合表 2-41 的规定。35kV 及以上架空电力线与单罐容积大于 200m³ 或总容积大于 1000m³ 液化石油气储罐（区）的最近水平距离不应小于 40m。生产的火灾危险性应根据生产中使用或生产的物质性质及其数量等因素划分，可分为甲、乙、丙、丁、戊类，生产的火灾危险性分类见表 2-42；储存物品的火灾危险性应根据物品的性质和储存物品中的可燃物数量等因素划分，可分为甲、乙、丙、丁、戊类，储存物品的火灾危险性分类见表 2-43。

表 2-41　　架空电力线与甲、乙类厂房（仓库），可燃材料堆垛等的最近水平距离

名　　称	至架空电力线中心线最近水平距离（m）
甲、乙类厂房（仓库），可燃材料堆垛，甲、乙类液体储罐，液化石油气储罐，可燃、助燃气体储罐	电杆（塔）高度的 1.5 倍
直埋地下的甲、乙类液体储罐和可燃气体储罐	电杆（塔）高度的 0.75 倍
丙类液体储罐	电杆（塔）高度的 1.2 倍
直埋地下的丙类液体储罐	电杆（塔）高度的 0.6 倍

表 2-42　　生产的火灾危险性分类

生产的火灾危险性类别	使用或产生下列物质生产的火灾危险性特征
甲	1. 闪点小于 28℃的液体； 2. 爆炸下限小于 10%的气体； 3. 常温下能自行分解或在空气中氧化能导致迅速自燃或爆炸的物质； 4. 常温下受到水或空气中水蒸气的作用，能产生可燃气体并引起燃烧或爆炸的物质； 5. 遇酸、受热、撞击、摩擦、催化以及遇有机物或硫磺等易燃的无机物，极易引起燃烧或爆炸的强氧化剂； 6. 受撞击、摩擦或与氧化剂、有机物接触时能引起燃烧或爆炸的物质； 7. 在密闭设备内操作温度不小于物质本身自燃点的生产
乙	1. 闪点不小于 28℃，但小于 60℃的液体； 2. 爆炸下限不小于 10%的气体； 3. 不属于甲类的氧化剂； 4. 不属于甲类的易燃固体； 5. 助燃气体； 6. 能与空气形成爆炸性混合物的浮游状态的粉尘、纤维、闪点不小于 60℃的液体雾滴
丙	1. 闪点不小于 60℃的液体； 2. 可燃固体

续表

生产的火灾危险性类别	使用或产生下列物质生产的火灾危险性特征
丁	1. 对不燃烧物质进行加工，并在高温或熔化状态下经常产生强辐射热、火花或火焰的生产； 2. 利用气体、液体、固体作为燃料或将气体、液体进行燃烧作其他用的各种生产； 3. 常温下使用或加工难燃烧物质的生产
戊	常温下使用或加工不燃烧物质的生产

表 2-43　　储存物品的火灾危险性分类

储存物品的火灾危险性类别	储存物品的火灾危险性特征
甲	1. 闪点小于 28℃的液体； 2. 爆炸下限小于 10%的气体，受到水或空气中水蒸气的作用能产生爆炸下限小于 10%气体的固体物质； 3. 常温下能自行分解或在空气中氧化能导致迅速自燃或爆炸的物质； 4. 常温下受到水或空气中水蒸气的作用，能产生可燃气体并引起燃烧或爆炸的物质； 5. 遇酸、受热、撞击、摩擦以及遇有机物或硫磺等易燃的无机物，极易引起燃烧或爆炸的强氧化剂； 6. 受撞击、摩擦或与氧化剂、有机物接触时能引起燃烧或爆炸的物质
乙	1. 闪点不小于 28°C，但小于 60℃的液体； 2. 爆炸下限不小于 10%的气体； 3. 不属于甲类的氧化剂； 4. 不属于甲类的易燃固体； 5. 助燃气体； 6. 常温下与空气接触能缓慢氧化，积热不散引起自燃的物品
丙	1. 闪点不小于 60℃的液体； 2. 可燃固体
丁	难燃烧物品
戊	不燃烧物品

（3）GB 50016—2014《建筑设计防火规范》规定：液化天然气气化站的液化天然气储罐（区）与输电线路的防火间距不应小于表 2-44 的规定；液化石油气供应基地的全压式和半冷冻式储罐（区）与输电线路的防火间距不应小于表 2-45 的规定。

表 2-44　　液化天然气气化站的液化天然气储罐（区）与输电线路的防火间距

名称	液化天然气储罐（区）（总容积 V_t，m³）							集中放散装置的天然气放散总管
	$V_t \leqslant 10$	$10 < V_t \leqslant 30$	$30 < V_t \leqslant 50$	$50 < V_t \leqslant 200$	$200 < V_t \leqslant 500$	$500 < V_t \leqslant 1000$	$1000 < V_t \leqslant 2000$	
单罐容积 V（m³）	$V \leqslant 10$	$V \leqslant 30$	$V \leqslant 50$	$V \leqslant 200$	$V \leqslant 500$	$V \leqslant 1000$	$V \leqslant 2000$	
架空输电线路	至架空输电线路中心线防火间距（m）							
	电杆（塔）高度的 1.5 倍					电杆（塔）高度的 1.5 倍，但 35kV 及以上架空输电线路不应小于 40m		电杆（塔）高度的 2.0 倍

表 2-45　　液化石油气供应基地的全压式和半冷冻式储罐（区）与输电线路的防火间距

名称	液化石油气储罐（区）（总容积 V_t，m³）						
	$30 < V_t \leqslant 50$	$50 < V_t \leqslant 200$	$200 < V_t \leqslant 500$	$500 < V_t \leqslant 1000$	$1000 < V_t \leqslant 2500$	$2500 < V_t \leqslant 5000$	$5000 < V_t \leqslant 10000$
单罐容积 V（m³）	$V \leqslant 10$	$V \leqslant 30$	$V \leqslant 50$	$V \leqslant 200$	$V \leqslant 500$	$V \leqslant 1000$	$V \leqslant 2000$
架空输电线路	至架空输电线路中心线防火间距（m）						
	电杆（塔）高度的 1.5 倍				电杆（塔）高度的 1.5 倍，但 35kV 及以上架空输电线路不应小于 40m		

（4）GB 50028—2006《城镇燃气设计规范》规定：压缩天然气加气站气瓶车固定车位与架空输电线路的防火间距不应小于表2-46的规定；气化站和混气站的液化石油气储罐与架空输电线路的防火间距不应小于表2-47的规定。

表2-46　　气瓶车固定车位与架空输电线路的防火间距

名称	气瓶车在固定车位最大储气总容积 V_t（m³）	
	$4500<V_t<10000$	$10000<V_t<30000$
	至架空输电线路中心线防火间距（m）	
架空输电线路	电杆（塔）高度的1.5倍	

表2-47　　气化站和混气站的液化石油气储罐与架空输电线路的防火间距

名称	液化石油气储罐（总容积 V_t，m³）		
	$V_t\leqslant 10$	$10<V_t\leqslant 30$	$30<V_t\leqslant 50$
单罐容积 V（m³）	—	—	≤20
架空输电线路	至架空输电线路中心线防火间距（m）		
	电杆（塔）高度的1.5倍		

（5）GB 50183—2004《石油天然气工程设计防火规范》规定：石油天然气站场与架空输电线路的防火间距不应小于表2-48的规定。油品、液化石油气、天然气凝液站场按储罐总容量划分等级，应符合表2-49的规定。

（6）GB 50160—2008《石油化工企业设计防火规范》规定：石油化工企业与架空输电线路的防火间距不应小于表2-50的规定。

表2-48　　石油天然气站场与架空输电线路防火间距

名称	油品站场、天然气站场					液化石油气和天然气凝液站场					可能携带可燃液体的火炬
	一级	二级	三级	四级	五级	一级	二级	三级	四级	五级	
35kV及以上输电线路	至架空输电线路中心线防火间距（m）										
	电杆（塔）高度的1.5倍且不小于30m				电杆（塔）高度的1.5倍	40			电杆（塔）高度的1.5倍且不小于30m	电杆（塔）高度的1.5倍	80

表2-49　　油品、液化石油气、天然气凝液站场分级

等级	油品储存总容量 V_p（m³）	液化石油气、天然气凝液储存总容量 V_l（m³）
一级	$V_p\geqslant 100000$	$V_l>5000$
二级	$30000\leqslant V_p<100000$	$2500<V_l\leqslant 5000$
三级	$4000<V_p<30000$	$1000<V_l\leqslant 2500$
四级	$500<V_p\leqslant 4000$	$200<V_l\leqslant 1000$
五级	$V_p\leqslant 500$	$V_l\leqslant 200$

表2-50　　石油化工企业与架空输电线路防火间距

名称	液化烃罐组（罐外壁）	甲、乙类液体罐组（罐外壁）	可能携带可燃液体的高架火炬（火炬筒中心）	甲、乙类工艺装置或设施（最外侧设备外缘或建筑物的最外轴线）
架空输电线路	至架空输电线路中心线防火间距（m）			
	电杆（塔）高度的1.5倍	电杆（塔）高度的1.5倍	80	电杆（塔）高度的1.5倍

2. 汽车加油加气站

GB 50156—2012《汽车加油加气站设计与施工规范（2014 版）》规定：

（1）加油站、加油加气合建站的汽油设备与架空输电线路的安全间距不应小于表 2-51 的规定。

（2）加油站、加油加气合建站的柴油设备与架空输电线路的安全间距不应小于表 2-52 的规定。

（3）LPG（液化石油气，liquefied petroleum gas）加气站、加油加气合建站的 LPG 储罐与架空输电线路的安全间距不应小于表 2-53 的规定。

（4）LPG 加气站、加油加气合建站的 LPG 卸车点、放散管管口、加气机与架空输电线路的安全间距不应小于表 2-54 的规定。

（5）CNG（压缩天然气，compressed natural gas）加气站和加油加气合建站的压缩天然气工艺设备与架空输电线路的安全间距不应小于表 2-55 的规定。

（6）加气站、加油加气合建站的 LNG（液化天然气，liquefied natural gas）储罐、放散管管口、LNG 卸车点与站与架空输电线路的安全间距不应小于表 2-56 的规定。

表 2-51　　加油站、加油加气合建站的汽油设备与架空输电线路的安全间距

名称	站内汽油设备											
	埋地油罐									加油机、通气管管口		
	一级站			二级站			三级站					
	无油气回收系统	有卸油油气回收系统	有卸油和加油油气回收系统	无油气回收系统	有卸油油气回收系统	有卸油和加油油气回收系统	无油气回收系统	有卸油油气回收系统	有卸油和加油油气回收系统	无油气回收系统	有卸油油气回收系统	有卸油和加油油气回收系统
架空输电线路（无绝缘层）	至架空输电线路中心线安全间距（m）											
	电杆（塔）高度的 1.5 倍，且不应小于 6.5m			电杆（塔）高度的 1.0 倍，且不应小于 6.5m			6.5			6.5		

表 2-52　　加油站、加油加气合建站的柴油设备与架空输电线路的安全间距

名称	站内柴油设备			
	埋地油罐			加油机、通气管管口
	一级站	二级站	三级站	
架空输电线路（无绝缘层）	至架空输电线路中心线安全间距（m）			
	电杆（塔）高度的 0.75 倍，且不应小于 6.5m	电杆（塔）高度的 0.75 倍，且不应小于 6.5m	6.5	6.5

表 2-53　　LPG 加气站、加油加气合建站的 LPG 储罐与架空输电线路的安全间距

名称	地上 LPG 储罐			地埋 LPG 储罐		
	一级站	二级站	三级站	一级站	二级站	三级站
架空输电线路（无绝缘层）	至架空输电线路中心线安全间距（m）					
	电杆（塔）高度的 1.5 倍				电杆（塔）高度的 1.0 倍	

表 2-54　　LPG 卸车点、放散管管口、加气机与架空输电线路的安全间距

名称	站内 LPG 设备		
	LPG 卸车点	放散管管口	加气机
架空输电线路（无绝缘层）	至架空输电线路中心线安全间距（m）		
	电杆（塔）高度的 1.0 倍		

表 2-55　　CNG 加气站和加油加气合建站的压缩天然气工艺设备与架空输电线路的安全间距

名称	站内 CNG 工艺设备		
	储气瓶	集中放散管管口	储气井、加（卸）气设备、脱硫脱水设备、压缩机（间）
架空输电线路（无绝缘层）	至架空输电线路中心线安全间距（m）		
	电杆（塔）高度的 1.5 倍		电杆（塔）高度的 1.0 倍

表 2-56　　加气站、加油加气合建站的 LNG 储罐、放散管管口、LNG 卸车点与站与架空输电线路的安全间距

名称	站内 LNG 设备				
	地上 LNG 储罐			放散管管口、加气机	LNG 卸车点
	一级站	二级站	三级站		
架空输电线路（无绝缘层）	至架空输电线路中心线安全间距（m）				
	电杆（塔）高度的 1.5 倍			电杆（塔）高度的 1.0 倍	

3. 油气井

GB 50183—2004 规定：油气井与架空输电线路的防火间距不应小于表 2-57 的规定。对于无自喷能力且井场没有储罐和工艺容器的油井，当按表 2-57 规定距离执行有困难时，防火间距可适当缩小，但应满足修井作业要求，同时取得协议并获得运维单位原则同意。线路避让油气井距离除需满足上述要求外，尚需注意与相关单位协议中的其他要求，同时注意与储油气设施、管道等附属设施的避让距离和保护要求。

表 2-57　　油气井与架空输电线路的防火间距

名称	自喷油井、气井、注气井	机械采油井
架空输电线路	至架空输电线路中心线防火间距（m）	
	电杆（塔）高度的 1.5 倍	

4. 氧气站

GB 50030—2013《氧气站设计规范》规定：氧气站火灾危险性为乙类的建筑物及氧气贮罐与架空输电线路的防火间距不应小于表 2-58 的规定。

表 2-58　　氧气站火灾危险性为乙类的建筑物及氧气贮罐与架空输电线路的防火间距

名称	氧气站火灾危险性为乙类的建筑物	氧气贮罐总容积 V_t（m^3）		
		$V_t \leqslant 1000$	$1000 < V_t \leqslant 5000$	$V_t > 5000$
架空输电线路	至架空输电线路中心线防火间距（m）			
	电杆（塔）高度的 1.5 倍			

三、埋地石油、天然气管道有关规程、规范

1. 《中华人民共和国石油天然气管道保护法》

2010 版《中华人民共和国石油天然气管道保护法》规定：输电线路不应跨越管道的加压站、加热站、计量站、集油站、集气站、输油站、输气站、配气站、处理场、清管站、阀室、阀井、放空设施、油库、储气库、装卸栈桥、装卸场。

2. 《埋地钢质管道交流干扰防护技术标准》

GB/T 50698—2011《埋地钢质管道交流干扰防护技术标准》规定：在开阔地区，埋地管道与高压交流输电线路杆塔基脚间控制的最小距离不宜小于杆塔高度；在路径受限地区，埋地管道与交流输电系统的各种接地装置之间的最小水平距离一般情况下不宜小于表 2-59 的规定，在采取故障屏蔽、接地、隔离等防护措施后，表 2-59 规定的距离可适当减小；管道与 110kV 及以上高压交流输电线路的交叉角度不宜小于 55°。在不能满足要求时，宜根据工程实际情况进行管道安全评估，结合防护措施，交叉角度可适当减小。

表 2-59　　埋地管道与交流接地体的最小水平距离

标称电压（kV）	≤220	330	500
铁塔或电杆接地（m）	5.0	6.0	7.5

3. 《钢制管道外腐蚀控制规程》

GB/T 21447—2008《钢制管道外腐蚀控制规程》规定：埋地管道与架空输电线路平行敷设时控制的最小水平距离宜按表 2-60 的规定执行；一般情况下，交流电力系统的各种接地装置与埋地管道之间的水平距离不宜小于表 2-61 的规定；在埋地管道与架空输电线路的距离不能满足表 2-60、表 2-61 的要求时或在路径受限地区，在采取隔离、屏蔽、接地等防护措施后，表 2-60、表 2-61 规定的距离可适当减小，但最小水平距离应大于 0.5m。

表 2-60　　埋地管道与架空输电线路最小水平距离

地形	标称电压（kV）			
	35～66	110～220	330	500
	边导线至管道任何部分的最小水平距离（m）			
开阔地区	最高杆（塔）高			
路径受限地区	4.0	5.0	6.0	7.5

表 2-61 埋地管道与交流接地体最小水平距离 m

标称电压（kV）	35	110	220	330	500
铁塔或电杆接地	3.0	5.0	5.0	6.0	7.5

4. 《输油管道工程设计规范》

GB 50253—2014《输油管道工程设计规范》规定：管道与架空输电线路平行敷设时，其距离应符合现行 GB 50061—2010 及 GB 50545—2010 的有关规定。

5. 《石油天然气工程设计防火规范》

GB 50183—2015 规定：油田内部埋地集输管道与架空输电线路平行敷设时，安全距离应不小于表 2-62 的规定；当管道地面敷设时，其间距不应小于本段最高杆（塔）高度。

表 2-62 埋地集输管道与架空输电线路最小水平距离

地形	标称电压（kV）		
	35～66	110	220
	边导线至管道任何部分的最小水平距离（m）		
开阔地区	最高杆（塔）高		
路径受限地区	4.0	4.0	5.0

四、城镇燃气埋地管道有关规程、规范

GB 50028—2006《城镇燃气设计规范》、CJJ 95—2013《城镇燃气埋地钢质管道腐蚀控制技术规程》规定：当管道在高压交流电力系统接地体附近埋设时，必须采取安全可靠的防护措施，地下燃气管道与交流电力线接地体的安全距离不应小于表 2-63 的规定。

表 2-63 地下管道与交流接地体的净距 m

标称电压（kV）	35	110	220
铁塔或电杆接地	3.0	5.0	10.0

五、机场净空和障碍物限制面有关文件及标准

1. 军用机场

（1）输电线路距军用机场（含军民和用机场）距离较近时，线路对军用机场净空和障碍物限制面等要求应满足国发〔2001〕29 号《国务院、中央军委关于印发〈军用机场净空规定〉的通知》相关规定。

（2）军用机场端净空区、侧净空区障碍物限制面要求见表 2-64、表 2-65；机场净空平面示意图、剖面示意图（以二级机场为例）如图 2-4、图 2-5 所示。

表 2-64 端净空区障碍物限制面要求

机场等级		四、三	二	一
第一段	长度	3000m	1500m	1500m
	坡度	1/100	1/75	1/75
	末端高度	30m	20m	20m
第二段	长度	6000m	8000m	9500m
	坡度	1/50	1/50	1/50
	末端高度	150m	180m	210m
第三段	长度	6000m	5500m	3000m
	坡度	水平	水平	水平
	末端高度	150m	180m	210m
第四段	长度	5000m	5000m	—
	坡度	1/25	1/25	—
	末端高度	350m	380m	
每端总长度		20000m	20000m	14000m

表 2-65 侧净空区障碍物限制面要求

机场等级		四、三	二	一
过渡面	坡度	1/10	1/10	1/10
内水平面	半径	4000m	3500m	3500m
	高度	50m	60m	60m
锥形面	半径	13000m	13100m	6500m
	坡度	1/30	1/30	1/20
	外边线高度	350m	380m	210m
外水平面	高度	350m	380m	210m
跑道中线每侧总宽度		15000m	13100m	6500m

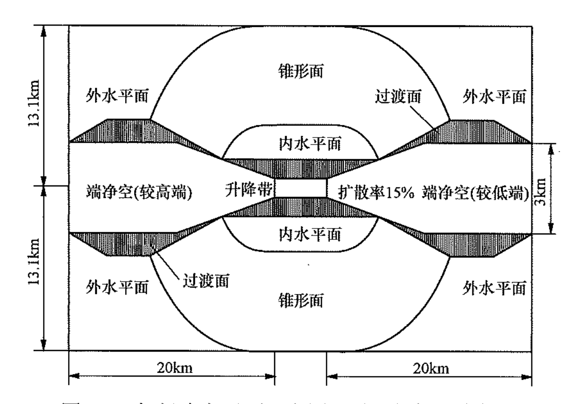


图 2-4 机场净空平面示意图（以二级机场为例）

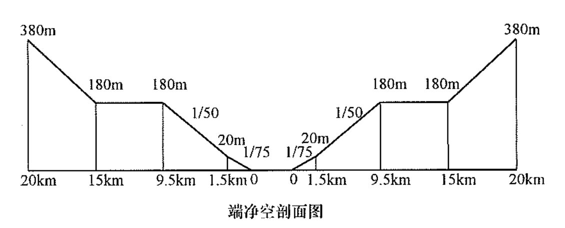
图 2-4 中，过渡面从升降带和端净空区限制面边

线开始，按 1/10 坡度向上向外倾斜，直至与相应的内水平面、锥形面、外水平面相交，升降带两侧过渡面起算点高程采用跑道中线距该点最近处的高程；端净空区两侧过渡面起算高程为端净空区限制面边线上的高程，过渡面的坡度必须在与跑道方向垂直的平面中度量。

内水平面从过渡面的外边线开始，水平向外延伸，直至与锥形面相交。其交线由以升降带端线中点在内水平面延伸面内的投影点为圆心，按规定半径作的圆弧和与圆弧相切并与跑道方向一致的直线组成。起算高程采用跑道两端中点高程较高者。

锥形面从内水平面的外边线开始，按规定坡度向上向外倾斜，直至与外水平面相交。其交线由以升降带端线中点在外水平面延伸面内的投影点为圆心、按规定半径作的圆弧和与圆弧相切并与跑道方向一致的直线组成。锥形面的坡度必须在与内水平面周边成直角的垂直面中度量。

外水平面从锥形面和端净空区两侧过渡面的外边线开始，水平向外延伸，直至机场净空区边缘。



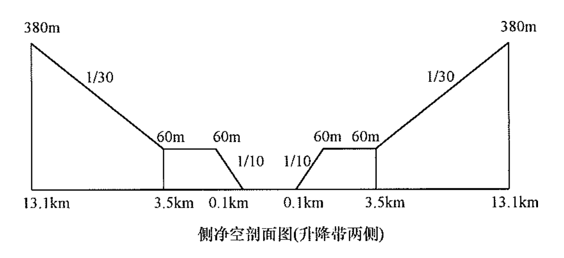


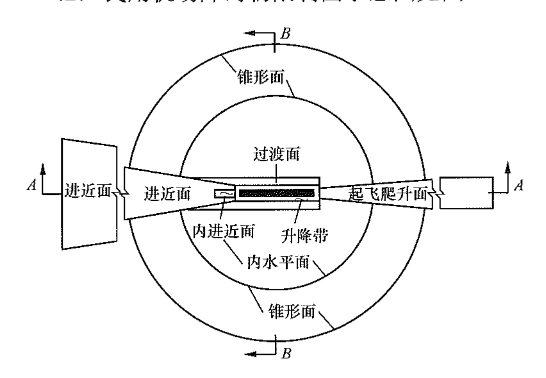
图 2-5　机场净空剖面示意图（以二级机场为例）

（3）军用机场导航台的防护间距要求见第十三章环境保护表 13-4 规定。

2. 民用机场

（1）输电线路距民用机场距离较近时，线路对民用机场净空和障碍物限制面等要求应满足 MH 5001—2013《民用机场飞行区技术标准》相关规定。

（2）民用机场障碍物限制面示意图见图 2-6。



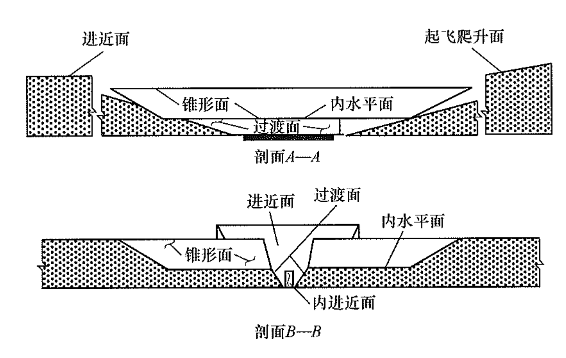


图 2-6　障碍物限制面示意图

1）内水平面是位于机场及其周围以上的一个水平面中的一个面，如图 2-6 所示。内水平面的起算标高应为跑道两端入口中点的平均标高。以跑道两端入口中点为圆心，按表 2-66 规定的内水平面半径画出圆弧，再以与跑道中线平行的两条直线与圆弧相切成一个近似椭圆形，形成一个高出起算标高 45m 的水平面。

表 2-66　　进近跑道的障碍物限制面的尺寸和坡度

障碍物限制面及尺寸[①]		跑道类别									
		非仪表跑道				非精密进近跑道			精密进近跑道		
									Ⅰ类		Ⅱ类或Ⅲ类
		飞行区指标Ⅰ				飞行区指标Ⅰ			飞行区指标Ⅰ		飞行区指标Ⅰ
		1	2	3	4	1，2	3	4	1，2	3，4	3，4
锥形面	坡度	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
	高度（m）	35	55	75	100	60	75	100	60	100	100
内水平面	高度（m）	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
	半径（m）	2000	2500	4000	4000	3500	4000	4000	3500	4000	4000

续表

障碍物限制面及尺寸①			跑道类别									
			非仪表跑道				非精密进近跑道			精密进近跑道		
										Ⅰ类		Ⅱ类或Ⅲ类
			飞行区指标Ⅰ				飞行区指标Ⅰ			飞行区指标Ⅰ		飞行区指标Ⅰ
			1	2	3	4	1，2	3	4	1，2	3，4	3，4
内进近面	宽度（m）		—	—	—	—	—	—	—	90	120*	120*
	距跑道入口距离（m）		—	—	—	—	—	—	—	60	60	60
	长度（m）		—	—	—	—	—	—	—	900	900	900
	坡度		—	—	—	—	—	—	—	2.5%	2%	2%
进近面	内边长度（m）		60	80	150	150	150	300	300	150	300	300
	距跑道入口距离（m）		30	60	60	60	60	60	60	60	60	60
	散开率（每侧）		10%	10%	10%	10%	15%	15%	15%	15%	15%	15%
	第一段	长度（m）	1600	2500	3000	3000	2500	3000	3000	3000	3000	3000
		坡度	5%	4%	3.33%	2.50%	3.33%	2%	2%	2.50%	2%	2%
	第二段	长度（m）	—	—	—	—	—	3600**	3600**	12000**	3600**	3600**
		坡度	—	—	—	—	—	2.50%	2.50%	3%	2.50%	2.50%
	水平段	长度（m）	—	—	—	—	—	8400**	8400**	—	8400**	8400**
		总长度（m）	—	—	—	—	—	15000	15000	15000	15000	15000
过渡面	坡度		20%	20%	14.3%	14.3%	20%	14.3%	14.3%	14.3%	14.3%	14.3%
	内过渡面坡度		—	—	—	—	—	—	—	40%	33.3%	33.3%
复飞面	内边长度（m）		—	—	—	—	—	—	—	90	120*	120*
	距跑道入口距离（m）		—	—	—	—	—	—	—	距升降带端的距离	1800***	1800***
	散开率（每侧）		—	—	—	—	—	—	—	10%	10%	10%
	坡度		—	—	—	—	—	—	—	4%	3.33%	3.33%

① 除另有注明外，所有尺寸均为水平度量。

* 飞行区指标Ⅱ为F时，该宽度增加到155m。

** 可变的长度见（3）障碍物限制应符合下列要求中的6)。

*** 或距跑道端距离者，两者取小者。

2）锥形面是从内水平面周边起向上和向外倾斜的一个面，如图2-6所示。锥形面的起端应从内水平面的周边开始，其起算标高应为内水平面的标高，以1∶20的坡度向上和向外倾斜，直到符合表2-66规定的锥形面外缘高度为止。锥形面的界限应包括以下几方面：

底边：与内水平面周边相重合；

顶边：高出内水平面一个规定高度的近似椭圆水平面的周边。

锥形面的坡度应在与内水平面周边成直角的铅垂面中度量。

3）进近面是跑道入口前的一个倾斜的平面或几个平面的组合，如图2-6所示。进近面的界限应包括以下几方面：

一条内边：位于跑道入口前的一个规定距离处，一条规定长度且垂直于跑道中线延长线的水平线。内边的标高应等于跑道入口中点的标高。

两条侧边：以内边的两端为起点，自跑道的中线延长线均匀地以规定的比率向外散开。

一条外边：平行于内边。

当采用横向偏置、偏置或曲线进近时，自进近面内边两端按规定的散开率均匀散开的两侧边应对称于

横向偏置、偏置或曲线进近的地面航迹的中线延长线。

进近面的坡度应在包含有跑道中线的铅垂面内度量，同时应连续包含任何横向偏置、偏置或曲线进近的地面航迹的中线。

4）内进近面是进近面中紧靠跑道入口前的一块长方形部分，进近面的界限应包括以下几方面：

一条内边：与进近面内边的位置重合，一条规定长度且垂直于跑道中线延长线的水平线。

两条侧边：以内边的两端为起点，平行于包含跑道中线的垂直平面向外延伸。

一条外边：平行于内边。

5）过渡面是沿升降带边缘和部分进近面边缘坡度向上和向外倾斜到内水平面的一个复合面。过渡面的界限应包括以下几方面：

底边：从进近面侧边与内水平面相交处开始，沿进近面侧边向下延伸至进近面的内边，再从该处沿升降带的全场与跑道中线相平行。底边上沿进近面侧边部分的标高等于进近面在该点的标高，底边上沿升降带部分的标高等于跑道中线或其延长线上最近点的标高。

顶边：位于内水平面的平面上。

过渡面的坡度应在与跑道中线成直角的铅垂面内度量。

6）内过渡面是类似于过渡面的面，但更接近于跑道，如图 2-7 所示。内过渡面的界限应包括以下几方面：

底边：从内进近面的末端开始，沿内进近面的侧边向下延伸到该面的内边，从该处沿升降带平行于跑道中线至复飞面的内边，然后再从该处沿复飞面的边线向上至该边线与内水平面相交处为止。底边沿内进近面和复飞面的侧边部分的标高等于该点特定面的标高，底边沿升降带部分的标高等于跑道中线或其延长线上最近点的标高。

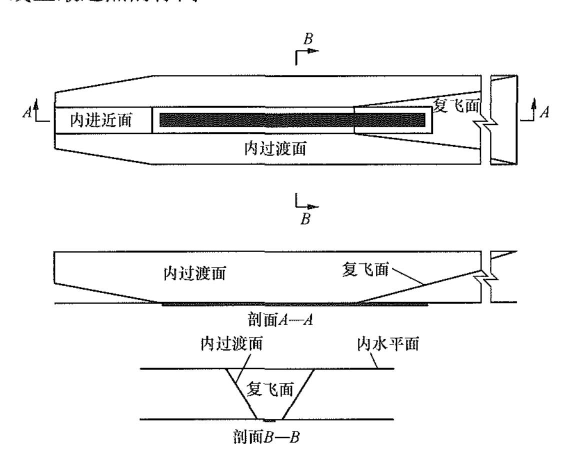


图 2-7　障碍物限制面-内进近面、内过渡面、复飞面

顶边：位于内水平面的平面上。

内过渡面的坡度应在与跑道中线成直角的铅垂面内度量。

7）复飞面是位于跑道入口后面一个规定距离的、在两侧内过渡面之间延伸的一个倾斜平面，如图 2-7 所示。复飞面的界限应包括以下几方面：

一条内边：位于跑道入口后面一个规定的距离，并垂直于跑道中线的水平线。内边的标高应等于在内边位置处的跑道中线的标高。

两条侧边：以内边的两端为起点，并从含有跑道中线的垂直平面以规定的比率均匀地向外扩展。

一条外边：平行于内边，并位于内水平面的平面内。

复飞面的坡度应在含有跑道中线的铅垂面内度量。

8）起飞爬升面是跑道端或净空道端外的一个倾斜平面或其他规定的面，如图 2-6 所示。起飞爬升面的界限应包括以下几方面：

一条内边：位于跑道端外规定距离处，或当设有净空道而其长度超过上述规定距离时位于净空道端处，垂直于跑道中线的一条水平线；内边标高应等于从跑道端至内边之间的跑道中线延长线上最高点的标高，当设有净空道时，内边标高应等于净空道中线上地面最高点的标高。

两条侧边：以内边的两端为起点，从起飞航道以规定的比率均匀地扩展至一个规定的最终宽度，然后在起飞爬升面的剩余长度内继续维持这一宽度。

一条外边：垂直于规定的起飞航道的一条水平线。

在起飞航道为直线的情况下，起飞爬升面的坡度应在含有跑道中线的铅垂面内度量。

在起飞航道带有转弯的情况下，起飞爬升面应是一条含有对其中线的水平法线的复合面，该中线的坡度应与直线起飞航道的坡度相同。

（3）障碍物限制应符合下列要求：

1）跑道一端或两端同时作为飞机起飞和降落使用时，障碍物限制高度应按表 2-66 和表 2-67 中较严格的要求进行控制。

内水平面、锥形面与进近面相重叠部分，障碍物限制高度应按较严格的要求进行控制。

当一个机场有几条跑道时，应按表 2-66 和表 2-67 的规定分别确定每条跑道的障碍物限制范围，其相互重叠部分应按较严格的要求进行控制。

2）非仪表跑道应设立下列障碍物限制面：锥形面、内水平面、进近面、过渡面。

3）非精密进近跑道应设立下列障碍物限制面：锥形面、内水平面、进近面、过渡面。

4）Ⅰ类精密进近跑道应设立下列障碍物限制面：

锥形面、内水平面、进近面、过渡面、内进近面、内过渡面、复飞面。

5）Ⅱ类或Ⅲ类精密进近跑道应设立下列障碍物限制面：锥形面、内水平面、进近面和内进近面、过渡面、内过渡面、复飞面。

6）仪表进近跑道坡度为 2.5%的那部分进近面与下列面相交处以外的进近面应是水平的：

a）一个高于跑道入口中点标高 150m 的水平面；

b）通过控制超障高度或超障高（OCA/H）的任何物体顶端的水平面。

上述两者中以较高的水平面为准。

7）供起飞的跑道应设立起飞爬升面，其尺寸和坡度见表 2-67。

表 2-67 供起飞用的跑道的障碍物限制面的尺寸和坡度 m

障碍物限制面及尺寸[①]	飞行区指标 I		
	1	2	3 或 4
内边长度	60	80	180
距跑道端距离[②]	30	60	60
散开率（每侧）	10%	10%	12.5%
最终宽度	380	580	1200，1800*
长度	1600	2500	15000
坡度	5%	4%	2%**

① 除另有规定者外，所有尺寸均为水平度量。

② 若净空道长度超出规定的距离，起飞爬升面从净空道末端开始。

* 在仪表气象条件和夜间目视气象条件下飞行，当拟用航道含有大于 15° 的航向变动时，采用 1800m。

** 见（3）障碍物限制应符合下列要求的 10）和 12）。

8）在机场障碍物限制范围内超过起飞爬升面、进近面、过渡面、锥形面以及内水平面的现有物体应予拆除或搬迁，除非：

a）经过研究认为在航行上采取措施，该物体不致危及飞行安全，并经民航行业主管部门批准。该物体应按规定设置障碍灯和（或）标志。

b）该物体被另一现有不能搬迁的障碍物所遮蔽。

注：遮蔽原则是指当物体被现有不能搬迁的障碍物所遮蔽，自该障碍物顶点向跑道相反方向为一水平面，向跑道方向为向下 1：10 的平面，任何在这两个平面以下的物体，即为被该不可搬迁的障碍物所遮蔽。遮蔽原则的应用应经航行部门研究认可。

9）新物体或现有物体进行扩建的高度不应超出起飞爬升面、进近面、过渡面、锥形面以及内水平面，除非该物体被另一现有不能搬迁的障碍物所遮蔽。

10）除由于其功能需要应设置在升降带上的易折物体外，所有固定物体不应超出内进近面、内过渡面或复飞面。在跑道用于飞机着陆期间，不应有可移动的物体高出这些限制面。

11）当准备使用该跑道的各种飞机的操作性能要求适合于应付临界的运行条件时，应考虑是否需要减小表 2-67 所规定的坡度。如果减小了规定的坡度，则应对起飞爬升面进行相应调整，使之提供保障直至末端 300m 的高度为止。

12）若当地条件与海平面标准大气条件相差很大，宜将表 2-67 所规定的坡度适当减小。减小的幅度取决于当地条件与海平面标准大气条件之间的差异程度以及使用该跑道的飞机的性能特性和操作要求。

13）若已存在的物体没有达到 2%（1：50）坡度的起飞爬升面，新物体应限制在保持原有的无障碍物面或保持一个坡度减小至 1.6%（1：62.5）的限制面内。

14）机场附近的高压输电线及其塔架应按障碍物限制面进行评估和控制，此外还应根据民用航空行业标准 MH 5001—2013 要求设置障碍物标志及灯光标识。

（4）障碍物限制面以外的物体为：障碍物限制面以外的机场附近地区，距机场跑道中心线两侧各 10km、跑道端外 20km 以内的区域内，高出地面标高 30m 且高出机场标高 150m 的物体应视为障碍物，除非经航行部门研究认为其并不危及飞行安全。

（5）民用机场导航台的防护间距要求见本书第十三章表 13-4 规定。

六、气象设施和气象探测环境保护条例

《气象设施和气象探测环境保护条例》（国务院令第 623 号，2012 年 12 月 1 日起施行）有关条款如下：

第二条 本条例所称气象设施，是指气象探测设施、气象信息专用传输设施和大型气象专用技术装备等。本条例所称气象探测环境，是指为避开各种干扰，保证气象探测设施准确获得气象探测信息所必需的最小距离构成的环境空间。

第三条 气象设施和气象探测环境保护实行分类保护、分级管理的原则。

第六条 任何单位和个人都有义务保护气象设施和气象探测环境，并有权对破坏气象设施和气象探测环境的行为进行举报。

第十条 禁止实施下列危害气象设施的行为：

（一）侵占、损毁、擅自移动气象设施或者侵占气象设施用地；

（二）在气象设施周边进行危及气象设施安全的爆破、钻探、采石、挖砂、取土等活动；

（三）挤占、干扰依法设立的气象无线电台（站）、

频率；

（四）设置影响大型气象专用技术装备使用功能的干扰源；

（五）法律、行政法规和国务院气象主管机构规定的其他危害气象设施的行为。

第十一条 大气本底站、国家基准气候站、国家基本气象站、国家一般气象站、高空气象观测站、天气雷达站、气象卫星地面站、区域气象观测站等气象台站和单独设立的气象探测设施的探测环境，应当依法予以保护。

第十二条 禁止实施下列危害大气本底站探测环境的行为：

（一）在观测场周边 3 万 m 探测环境保护范围内新建、扩建城镇、工矿区，或者在探测环境保护范围上空设置固定航线；

（二）在观测场周边 1 万 m 范围内设置垃圾场、排污口等干扰源；

（三）在观测场周边 1000m 范围内修建建筑物、构筑物。

第十三条 禁止实施下列危害国家基准气候站、国家基本气象站探测环境的行为：

（一）在国家基准气候站观测场周边 2000m 探测环境保护范围内或者国家基本气象站观测场周边 1000m 探测环境保护范围内修建高度超过距观测场距离 1/10 的建筑物、构筑物；

（二）在观测场周边 500m 范围内设置垃圾场、排污口等干扰源；

（三）在观测场周边 200m 范围内修建铁路；

（四）在观测场周边 100m 范围内挖筑水塘等；

（五）在观测场周边 50m 范围内修建公路、种植高度超过 1m 的树木和作物等。

第十四条 禁止实施下列危害国家一般气象站探测环境的行为：

（一）在观测场周边 800m 探测环境保护范围内修建高度超过距观测场距离 1/8 的建筑物、构筑物；

（二）在观测场周边 200m 范围内设置垃圾场、排污口等干扰源；

（三）在观测场周边 100m 范围内修建铁路；

（四）在观测场周边 50m 范围内挖筑水塘等；

（五）在观测场周边 30m 范围内修建公路、种植高度超过 1m 的树木和作物等。

第十五条 高空气象观测站、天气雷达站、气象卫星地面站、区域气象观测站和单独设立的气象探测设施探测环境的保护，应当严格执行国家规定的保护范围和要求。

前款规定的保护范围和要求由国务院气象主管机构公布，涉及无线电频率管理的，国务院气象主管机构应当征得国务院无线电管理部门的同意。

第十七条 在气象台站探测环境保护范围内新建、改建、扩建建设工程，应当避免危害气象探测环境；确实无法避免的，建设单位应当向国务院气象主管机构或者省、自治区、直辖市气象主管机构报告并提出相应的补救措施，经国务院气象主管机构或者省、自治区、直辖市气象主管机构书面同意。未征得气象主管机构书面同意或者未落实补救措施的，有关部门不得批准其开工建设。

在单独设立的气象探测设施探测环境保护范围内新建、改建、扩建建设工程的，建设单位应当事先报告当地气象主管机构，并按照要求采取必要的工程、技术措施。

第十八条 气象台站站址应当保持长期稳定，任何单位或者个人不得擅自迁移气象台站。

因国家重点工程建设或者城市（镇）总体规划变化，确需迁移气象台站的，建设单位或者当地人民政府应当向省、自治区、直辖市气象主管机构提出申请，由省、自治区、直辖市气象主管机构组织专家对拟迁新址的科学性、合理性进行评估，符合气象设施和气象探测环境保护要求的，在纳入城市（镇）控制性详细规划后，按照先建站后迁移的原则进行迁移。

申请迁移大气本底站、国家基准气候站、国家基本气象站的，由受理申请的省、自治区、直辖市气象主管机构签署意见并报送国务院气象主管机构审批；申请迁移其他气象台站的，由省、自治区、直辖市气象主管机构审批，并报送国务院气象主管机构备案。

气象台站迁移、建设费用由建设单位承担。

第十九条 气象台站探测环境遭到严重破坏，失去治理和恢复可能的，国务院气象主管机构或者省、自治区、直辖市气象主管机构可以按照职责权限和先建站后迁移的原则，决定迁移气象台站；该气象台站所在地地方人民政府应当保证气象台站迁移用地，并承担迁移、建设费用。地方人民政府承担迁移、建设费用后，可以向破坏探测环境的责任人追偿。



第三章

交流输电线路电气部分

本章给出了交流输电线路电气方面的设计内容和设计方法，包括输电线路的电气参数、绝缘配合、防雷、接地、换位、静电感应、无线电干扰、可听噪声、地线设计等。

第一节　电　气　参　数

输电线路电气参数计算目前有以下几种计算方法：①卡松公式，由 Carson 和 Pollaczek 在 20 世纪 20 年代针对电话线路推导出来，同时也适用于架空线路。ATP-EMTP 中的子程序 Line Constants 和 Cable Constants 都是以卡松公式为基础编写的。②复穿透深度公式，20 世纪 70 年代 Dunbanton、Gary、Deri 等人以卡松公式为基础，将卡松公式中自阻抗系数、互阻抗系数以及卡松校正项进行了整合简化，提出了一种较为简单的计算电力线路序参数的方法，解决了卡松公式在特定情况下的不准确问题。③近似计算公式，忽略地线和大地对输电线路计算精度的影响。用简单的近似公式直接计算，计算简便但结果精确度不高。本节主要列出基于卡松公式的近似公式。需精确计算时可参考相关文献。

一、输电线路电气参数

1. 阻抗

假设导线与地线一起共有 n 相（根）导线，对于一个以地为回路的 n 相导线组成的系统，将是一个由 $n\times n$ 个元素的矩阵。电压电流关系如下：

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \tag{3-1}$$

矩阵中对角元素 Z_{ii}（$i=1$，2，…，n），是导线与大地形成回路的单位长度串联自阻抗，Ω/km；非对角元素 Z_{ik}（$k=1$，2，…，n）是导线 i 和导线 k 间的单位长度互阻抗，Ω/km。Z_{ii}、Z_{ik} 可利用卡松公式、复穿透深度公式、近似计算公式等计算，频率为 50Hz 时 Z_{ii}、Z_{ik} 的计算公式如下：

$$Z_{ii} = r_a + 0.05 + j0.1445\lg\frac{D_e}{R_e} \tag{3-2}$$

$$Z_{ik} = 0.05 + j0.1445\lg\frac{D_e}{D_{ik}} \tag{3-3}$$

式中　r_a ——输电线路单位长度电阻，Ω/km；

D_e ——虚拟导线的等值深度，它是大地电阻率 $\rho_e(\Omega\cdot m)$ 和频率 f（Hz）的函数，即

$$D_e = 660\sqrt{\frac{\rho_e}{f}} \tag{3-4}$$

D_{ik} ——两导线间间距，m；

R_e ——相分裂导线的有效半径，m。

相分裂导线有效半径的计算公式为

$$R_e = \sqrt[m]{mr_eS_m^{m-1}} \quad (m>1) \tag{3-5}$$

分裂导线半径

$$S_m = \frac{d}{2\sin(\pi/m)} \quad (m>1) \tag{3-6}$$

式中　S_m ——分裂导线半径，m；

m ——分裂导线的根数；

d ——分裂导线中相邻两根导线之间的距离，m；

r_e ——组成分裂导线的单根导线的有效半径，m。

对于非铁磁材料的单股线

$$r_e = re^{-\frac{1}{4}} = 0.779r \tag{3-7}$$

式中　r ——单导线的半径，m。

常用导线的 r_e 见表 3-1。

表 3-1　　常用导线有效半径 r_e

导线的种类	r_e
有色金属绞线 7 股	0.726r
有色金属绞线 19 股	0.758r

续表

导线的种类	r_e
有色金属绞线 37 股	0.768r
有色金属绞线 61 股	0.772r
有色金属绞线 91 股	0.774r
钢芯铝绞线	0.81r
空芯有色金属绞线及忽略钢芯影响的钢芯铝绞线两层 26 股	0.809r
空芯有色金属绞线及忽略钢芯影响的钢芯铝绞线两层 30 股	0.826r
空芯有色金属绞线及忽略钢芯影响的钢芯铝绞线三层 54 股	0.81r
单层钢芯铝绞线	0.35r ～0.70r

2. 电容

在静电场计算中，大地对与地面平行的带电导体电场的影响可用导体的镜像来代替，如图 3-1 所示。考虑有 n 条直导线组成的输电线路，导线的对地电压是线路上电荷的函数。电容矩阵如式（3-8）所示。

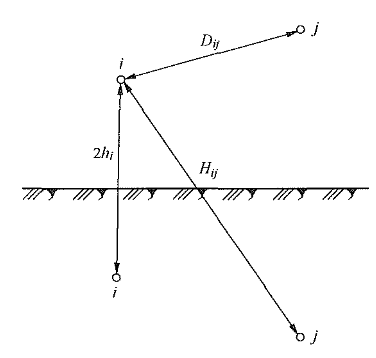


图 3-1　两平行于地面的导线

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} \tag{3-8}$$

式中　q_i（$i=1, 2, \cdots, n$）——第 i 根导线单位长度的电荷。

矩阵称为马克斯威尔电位系数矩阵，矩阵是对称的，其一般形式表达为

$$[U]=[P][q] \tag{3-9}$$

其对角矩阵元素是导线 i 的自电位系数 P_{ii}（单位 1/F/km），其表达式为

$$P_{ii}=\frac{1}{2\pi\varepsilon}\ln\frac{2h_i}{r_i} \tag{3-10}$$

式中　h_i——i 导线距离地面的平均高度，m；

r_i——导线的半径，m，分裂导线可用相分裂导线的有效半径 R_e 代替。

非对角元素导线 i 与导线 j 之间的互电位系数 P_{ij}（单位 1/F/km）为

$$P_{ij}=\frac{1}{2\pi\varepsilon}\ln\frac{H_{ij}}{D_{ij}} \tag{3-11}$$

式中　H_{ij}——导线 i 与导线 j 的镜像间的距离，m；

D_{ij}——导线 i 到导线 j 的距离，m。

式（3-10）和式（3-11）中 ε 是空间介电常数，$\frac{1}{2\pi\varepsilon}=17.975109\times10^6\text{km/F}$。

对式（3-9）中的电位系数矩阵求逆即可得到电容矩阵，即

$$[C]=[P]^{-1} \tag{3-12}$$

$$[q]=[C][U] \tag{3-13}$$

电容矩阵是以节点形式表示的，它的对角线元素是导线与所有其他导线以及地线之间的单位长度电容之和，非对角线元素是导线之间单位长度电容的负值。

二、序参数

本节讨论的线路参数，除特别说明者外，均系指三相导线的平均值，即按三相线路通过换位后获得完全对称考虑。对不换位三相线路，因其不对称度较小，也可以近似地适用，但不适用于“两线—大地”等不对称度很大的线路。本节阻抗单位均为欧姆/千米。

1. 正序（负序）阻抗

线路是静止设备，其正、负序阻抗相等。正序阻抗 Z_1 为

$$Z_1=R+jX_1 \tag{3-14}$$

式中　R——相导线电阻，Ω/km；

X_1——相导线的正序电抗，Ω/km。

（1）单回路单导线的正序电抗 X_1 为

$$X_1=0.0001\pi\mu f+0.029f\lg\frac{d_m}{r} \tag{3-15}$$

或

$$X_1=0.1445\lg\frac{d_m}{r_e} \tag{3-16}$$

$$d_m=\sqrt[3]{d_{ab}d_{bc}d_{ca}} \tag{3-17}$$

式中　μ——导线材料的相对磁导率，对于有色金属$\mu=1$；

f——频率，Hz；

d_m——相导线间的几何均距，m；

d_{ab}、d_{bc} 及 d_{ca}——分别为三相导线间距离，m；

r——导线的半径，m；

r_e——导线的有效半径，m。

（2）单回路相分裂导线的正序电抗 X_1 为

$$X_1=0.0001\pi\mu f+0.0029f\lg\frac{d_m}{R_m} \tag{3-18}$$

或
$$X_1 = 0.1445\lg\frac{d_m}{R_e} \qquad (3\text{-}19)$$

式中 R_e——相分裂导线的有效半径，m；

R_m——相导线的自几何均距，m。

$$R_m = \sqrt[m]{mrS_m^{m-1}} \quad (m>1) \qquad (3\text{-}20)$$

（3）双回路线路的每回路正序电抗见图 3-2，计算式为

$$X_1 = 0.1445\lg\frac{d_m d_{m2}}{R_e d_{m1}} \qquad (3\text{-}21)$$

$$d_m = \sqrt[3]{d_{ab}d_{ac}d_{bc}} \qquad (3\text{-}22)$$

$$d_{m1} = \sqrt[3]{d_{aa'}d_{bb'}d_{cc'}} \qquad (3\text{-}23)$$

$$d_{m2} = \sqrt[6]{d_{ab'}d_{ac'}d_{ba'}d_{bc'}d_{ca'}d_{cb'}} \qquad (3\text{-}24)$$

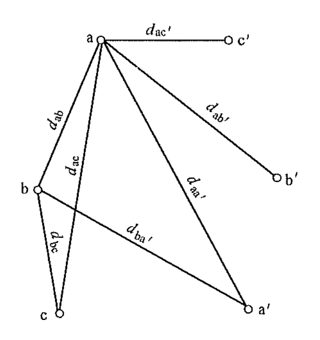


图 3-2 双回路正序电抗计算图

钢芯铝绞线、双分裂钢芯铝绞线、四分裂钢芯铝绞线、六分裂以上钢芯铝绞线的电阻及正序阻抗分别见表 3-2～表 3-5。

表 3-2 钢芯铝绞线的电阻及正序阻抗 Ω/km

导线型号	直流电阻（Ω/km）	几何均距（m）													
		1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
JL/G1A-10/2	2.706	0.423	0.441	0.455	0.466	0.476	0.485								
JL/G1A-16/3	1.779	0.410	0.428	0.442	0.453	0.463	0.471								
JL/G1A-25/4	1.131	0.395	0.413	0.427	0.439	0.449	0.457								
JL/G1A-35/6	0.8230	0.385	0.403	0.417	0.429	0.439	0.447								
JL/G1A-50/8	0.5946	0.375	0.393	0.407	0.419	0.428	0.437								
50/30	0.5692	0.363	0.381	0.395	0.407	0.416	0.425								
JL/G1A-70/10	0.4217	0.364	0.382	0.396	0.408	0.418	0.426	0.433	0.440	0.446					
70/40	0.4141	0.353	0.371	0.385	0.397	0.406	0.415	0.422	0.429	0.435					
JL/G1A-95/15	0.3058	0.353	0.371	0.385	0.397	0.406	0.415	0.422	0.429	0.435	0.440	0.445			
95/20	0.3019	0.352	0.370	0.384	0.396	0.405	0.414	0.421	0.428	0.434	0.439	0.444			
95/55	0.2992	0.343	0.361	0.375	0.387	0.396	0.405	0.412	0.419	0.425	0.430	0.435			
JL/G1A-120/7	0.2422	0.349	0.367	0.381	0.393	0.402	0.411	0.418	0.425	0.431	0.436	0.441			
120/20	0.2496	0.347	0.365	0.379	0.390	0.400	0.408	0.416	0.422	0.428	0.434	0.439			
120/25	0.2345	0.344	0.362	0.376	0.388	0.397	0.406	0.413	0.420	0.426	0.431	0.436			
120/70	0.2364	0.335	0.354	0.368	0.379	0.389	0.397	0.405	0.411	0.417	0.423	0.428			
JL/G1A-150/8	0.1989	0.343	0.361	0.375	0.387	0.396	0.405	0.412	0.419	0.425	0.430	0.435			
150/20	0.1980	0.340	0.358	0.372	0.384	0.394	0.402	0.409	0.416	0.422	0.428	0.433			
150/25	0.1939	0.339	0.357	0.371	0.382	0.392	0.400	0.408	0.414	0.420	0.426	0.431			
150/35	0.1962	0.337	0.355	0.369	0.381	0.391	0.399	0.406	0.413	0.419	0.425	0.430			
JL/G1A-185/10	0.1572			0.368	0.379	0.389	0.397	0.405	0.411	0.417	0.423	0.428	0.432	0.437	0.441
185/25	0.1542			0.365	0.376	0.386	0.394	0.402	0.408	0.414	0.420	0.425	0.429	0.434	0.438
185/30	0.1592			0.365	0.376	0.386	0.394	0.402	0.408	0.414	0.420	0.425	0.429	0.434	0.438
185/45	0.1564			0.362	0.374	0.383	0.392	0.399	0.406	0.412	0.417	0.422	0.427	0.431	0.435
JL/G1A-210/10	0.1411			0.364	0.376	0.385	0.394	0.401	0.408	0.414	0.419	0.424	0.429	0.433	0.437
210/25	0.1380			0.361	0.373	0.382	0.391	0.398	0.405	0.411	0.416	0.421	0.426	0.430	0.434
210/35	0.1363			0.360	0.371	0.381	0.389	0.397	0.403	0.409	0.415	0.420	0.425	0.429	0.433
210/50	0.1381			0.358	0.370	0.380	0.388	0.395	0.402	0.408	0.413	0.418	0.423	0.428	0.432
JL/G1A-240/30	0.1181			0.356	0.368	0.377	0.386	0.393	0.400	0.406	0.411	0.416	0.421	0.425	0.429
240/40	0.1209			0.356	0.367	0.377	0.386	0.393	0.400	0.406	0.411	0.416	0.421	0.425	0.429
240/55	0.1198			0.354	0.365	0.375	0.383	0.390	0.397	0.403	0.409	0.414	0.419	0.423	0.427
JL/G1A-300/15	0.09724									0.402	0.407	0.412	0.417	0.421	0.425
300/20	0.09520									0.401	0.406	0.411	0.416	0.420	0.424
300/25	0.09433									0.400	0.405	0.410	0.415	0.419	0.423
300/40	0.09614									0.399	0.405	0.410	0.414	0.419	0.423
300/50	0.09636									0.398	0.404	0.409	0.414	0.418	0.422
300/70	0.09463									0.396	0.402	0.407	0.411	0.416	0.420

续表

导线型号	直流电阻（Ω/km）	几何均距（m）													
		1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
JL/G1A-400/20	0.07104									0.392	0.397	0.402	0.407	0.411	0.416
400/25	0.07370									0.393	0.398	0.403	0.408	0.412	0.416
400/35	0.07389									0.392	0.398	0.403	0.407	0.412	0.416
400/50	0.07232									0.390	0.396	0.401	0.405	0.410	0.414
400/65	0.07236									0.389	0.395	0.400	0.405	0.409	0.413
400/95	0.07087									0.387	0.392	0.397	0.402	0.406	0.411
JL/G1A-500/35	0.05812									0.385	0.391	0.396	0.400	0.405	0.409
500/45	0.05912									0.385	0.391	0.396	0.400	0.405	0.409
500/65	0.05760									0.383	0.389	0.394	0.398	0.403	0.407
JL/G1A-630/45	0.04633									0.378	0.383	0.388	0.393	0.397	0.402
630/55	0.04514									0.377	0.382	0.387	0.392	0.396	0.400
630/80	0.04551									0.376	0.381	0.386	0.391	0.395	0.399
JL/G1A-800/55	0.03547									0.370	0.375	0.380	0.385	0.389	0.393
800/70	0.03574									0.369	0.375	0.380	0.384	0.389	0.393
800/100	0.03635									0.369	0.374	0.379	0.384	0.388	0.392
JL/G3A-900/40	0.0321									0.366	0.371	0.376	0.381	0.385	0.389
JL/G3A-1000/45	0.0289									0.361	0.366	0.371	0.376	0.380	0.384
JL1/G3A-1250/70	0.02291									0.355	0.361	0.366	0.370	0.375	0.379

表 3-3　　双分裂钢芯铝绞线的电阻及正序阻抗　　Ω/km

导线型号	直流电阻（Ω/km）	几何均距（m）							
		7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0	10.5	11.0
2×JL/G1A-300/15	0.04862	0.299	0.303	0.307	0.311	0.314	0.317	0.320	0.323
300/20	0.04760	0.299	0.303	0.307	0.310	0.314	0.317	0.320	0.323
300/25	0.04717	0.298	0.302	0.306	0.310	0.313	0.316	0.319	0.322
300/40	0.04807	0.298	0.302	0.306	0.309	0.313	0.316	0.319	0.322
300/50	0.04818	0.298	0.302	0.305	0.309	0.312	0.316	0.319	0.322
300/70	0.04732	0.296	0.300	0.304	0.308	0.311	0.315	0.318	0.321
2×JL/G1A-400/20	0.03552	0.294	0.298	0.302	0.306	0.309	0.312	0.316	0.318
400/25	0.03685	0.295	0.299	0.303	0.306	0.310	0.313	0.316	0.319
400/35	0.03695	0.294	0.298	0.302	0.306	0.309	0.313	0.316	0.319
400/50	0.03616	0.293	0.298	0.301	0.305	0.308	0.311	0.315	0.318
400/65	0.03618	0.293	0.297	0.301	0.305	0.308	0.311	0.314	0.317
400/95	0.03544	0.292	0.296	0.300	0.303	0.307	0.310	0.313	0.316
2×JL/G1A-500/35	0.02906	0.291	0.295	0.299	0.302	0.306	0.309	0.312	0.315
500/45	0.02956	0.291	0.295	0.299	0.302	0.306	0.309	0.312	0.315
500/65	0.02880	0.290	0.294	0.298	0.301	0.305	0.308	0.311	0.314
2×JL/G1A-630/45	0.02317	0.287	0.291	0.295	0.299	0.302	0.305	0.309	0.311
630/55	0.02257	0.287	0.291	0.295	0.298	0.302	0.305	0.308	0.311
630/80	0.02276	0.286	0.290	0.294	0.298	0.301	0.304	0.307	0.310
2×JL/G1A-800/55	0.01774	0.283	0.287	0.291	0.295	0.298	0.301	0.304	0.307
800/70	0.01787	0.283	0.287	0.291	0.294	0.298	0.301	0.304	0.307
800/100	0.01818	0.283	0.287	0.291	0.294	0.298	0.301	0.304	0.307

表 3-4　　四分裂钢芯铝绞线的电阻及正序阻抗　　Ω/km

导线型号	直流电阻（Ω/km）	几何均距（m）										
		10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	12.5	13.0	13.5	14.0	14.5	15.0
4×JL/G1A-300/15	0.02431	0.251	0.254	0.257	0.260	0.262	0.265	0.267	0.270	0.272	0.274	0.276
300/20	0.02380	0.251	0.254	0.257	0.259	0.262	0.265	0.267	0.269	0.272	0.274	0.276
300/25	0.02358	0.250	0.253	0.256	0.259	0.262	0.264	0.267	0.269	0.272	0.274	0.276
300/40	0.02404	0.250	0.253	0.256	0.259	0.262	0.264	0.267	0.269	0.271	0.274	0.276
300/50	0.02409	0.250	0.253	0.256	0.259	0.262	0.264	0.267	0.269	0.271	0.273	0.276
300/70	0.02366	0.249	0.253	0.255	0.258	0.261	0.263	0.266	0.268	0.271	0.273	0.275

续表

导线型号	直流电阻（Ω/km）	几何均距（m）										
		10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	12.5	13.0	13.5	14.0	14.5	15.0
4×JL/G1A-400/20	0.01776	0.248	0.251	0.254	0.257	0.260	0.262	0.265	0.267	0.270	0.272	0.274
400/25	0.01843	0.249	0.252	0.255	0.257	0.260	0.263	0.265	0.267	0.270	0.272	0.274
400/35	0.01847	0.248	0.252	0.254	0.257	0.260	0.263	0.265	0.267	0.270	0.272	0.274
400/50	0.01808	0.248	0.251	0.254	0.257	0.259	0.262	0.265	0.267	0.269	0.271	0.274
400/65	0.01809	0.248	0.251	0.254	0.257	0.259	0.262	0.264	0.267	0.269	0.271	0.273
400/95	0.01772	0.247	0.250	0.253	0.256	0.259	0.261	0.264	0.266	0.268	0.271	0.273
4×JL/G1A-500/35	0.01453	0.247	0.250	0.253	0.255	0.258	0.261	0.263	0.266	0.268	0.270	0.272
500/45	0.01478	0.247	0.250	0.253	0.255	0.258	0.261	0.263	0.266	0.268	0.270	0.272
500/65	0.01440	0.246	0.249	0.252	0.255	0.258	0.260	0.263	0.265	0.267	0.270	0.272
4×JL/G1A-630/45	0.01158	0.245	0.248	0.251	0.254	0.256	0.259	0.261	0.264	0.266	0.268	0.270
630/55	0.01129	0.245	0.248	0.251	0.253	0.256	0.259	0.261	0.263	0.266	0.268	0.270
630/80	0.01138	0.244	0.247	0.250	0.253	0.256	0.258	0.261	0.263	0.266	0.268	0.270
4×JL/G1A-800/55	0.00887	0.243	0.246	0.249	0.252	0.254	0.257	0.259	0.262	0.264	0.266	0.268
800/70	0.00894	0.243	0.246	0.249	0.252	0.254	0.257	0.259	0.262	0.264	0.266	0.268
800/100	0.00909	0.243	0.246	0.249	0.251	0.254	0.257	0.259	0.261	0.264	0.266	0.268
4×JL/G3A-900/40	0.00803	0.241	0.244	0.247	0.250	0.253	0.255	0.258	0.260	0.262	0.265	0.267
4×JL/G3A-1000/45	0.00723	0.240	0.243	0.246	0.249	0.252	0.254	0.257	0.259	0.261	0.263	0.266
4×JL1/G3A-1250/70	0.00573	0.239	0.242	0.245	0.247	0.250	0.253	0.255	0.257	0.260	0.262	0.264

表 3-5　六分裂以上钢芯铝绞线的电阻及正序阻抗　Ω/km

导线型号	直流电阻（Ω/km）	几何均距（m）									
		24	25	26	27	28	31	32	33	34	35
6×JL/G1A-400/35	0.07389/6	0.276	0.278	0.281	0.283	0.286					
6×JL/G1A-400/50	0.07232/6	0.276	0.278	0.281	0.283	0.285					
6×JL/G1A-400/65	0.07236/6	0.275	0.278	0.280	0.283	0.285					
6×JL/G1A-400/95	0.07087/6	0.275	0.278	0.280	0.282	0.285					
6×JL/G1A-500/35	0.05812/6	0.275	0.277	0.280	0.282	0.284					
6×JL/G1A-500/45	0.05912/6	0.275	0.277	0.280	0.282	0.284					
6×JL/G1A-500/65	0.0576/6	0.274	0.277	0.279	0.282	0.284					
6×JL/G1A-630/45	0.04633/6	0.274	0.276	0.279	0.281	0.283					
6×JL/G1A-630/55	0.04514/6	0.273	0.276	0.278	0.281	0.283					
6×JL/G1A-630/80	0.04551/6	0.273	0.276	0.278	0.281	0.283					
6×JL/G1A-800/55	0.03547/6	0.272	0.275	0.277	0.280	0.282					
6×JL/G1A-800/70	0.03574/6	0.272	0.275	0.277	0.279	0.282					
6×JL/G1A-800/100	0.03635/6	0.272	0.275	0.277	0.279	0.282					
8×JL/G1A-500/35	0.05812/8						0.269	0.271	0.273	0.275	0.277
8×JL/G1A-500/45	0.05912/8						0.269	0.271	0.273	0.275	0.277
8×JL/G1A-500/65	0.0576/8						0.269	0.271	0.273	0.275	0.277
8×JL/G1A-630/45	0.04633/8						0.269	0.271	0.272	0.274	0.276
8×JL/G1A-630/55	0.04514/8						0.268	0.270	0.272	0.274	0.276
8×JL/G1A-630/80	0.04551/8						0.268	0.270	0.272	0.274	0.276
8×JL/G1A-800/55	0.03547/8						0.267	0.269	0.271	0.273	0.275
8×JL/G1A-800/70	0.03574/8						0.267	0.269	0.271	0.273	0.275
8×JL/G1A-800/100	0.03635/8						0.267	0.269	0.271	0.273	0.275

2. 零序阻抗

（1）无地线单回路线路的零序阻抗 Z_0，计算式为

$$Z_0=(R+3R_g')+\mathrm{j}0.435\lg\frac{D}{\sqrt[3]{R_e d_m^2}}=(R+0.15)+\mathrm{j}0.435\lg\frac{D}{\sqrt[3]{R_e d_m^2}} \quad (3\text{-}25)$$

式中 R——每相导线的电阻，Ω/km；

D——地中电流的等价深度，m；

R_g'——大地电阻，当 f=50Hz 时，$R_g'\approx\pi^2 f\times10^4\approx0.05$，Ω/km；

f——频率，Hz；

d_m——三相导线间的几何均距，m；

R_e——每相导线的半径，分裂导线为等价半径，m。

（2）具有单地线时单回路线路的零序阻抗 $Z_{0(1)}$ 计算式为

$$Z_{0(1)}=Z_0-\frac{Z_{0(ag)}^2}{Z_{0(g)}} \quad (3\text{-}26)$$

$$Z_{0(g)}=3R_g+0.15+0.435\lg\frac{D}{r_{e(g)}} \quad (3\text{-}27)$$

$$Z_{0(ag)}=0.15+\mathrm{j}0.435\lg\frac{D}{\sqrt[3]{d_{ag}d_{bg}d_{cg}}} \quad (3\text{-}28)$$

式中 Z_0——无地线时的零序阻抗，可按式（3-25）计算；

$Z_{0(g)}$——地线的零序阻抗；

D——地中电流的等价深度，m；

R_g——地线的电阻，Ω/km；

$r_{e(g)}$——地线的等价半径，m；

$Z_{0(ag)}$——地线和三相导线之间的零序互阻抗；

d_{ag}、d_{bg}、d_{cg}——分别为三相导线至地线的距离，m。

（3）具有双地线的单回路线路的零序阻抗 $Z_{0(z)}$ 计算式为

$$Z_{0(z)}=Z_0-\frac{Z_{0(agh)}^2}{Z_{0(gh)}} \quad (3\text{-}29)$$

$$Z_{0(gh)}=1.5R_g+0.15+\mathrm{j}0.435\times\lg\frac{D}{\sqrt{r_{e(g)}d_{gh}}} \quad (3\text{-}30)$$

$$Z_{0(agh)}=0.15+\mathrm{j}0.435\lg\frac{D}{\sqrt[6]{d_{ag}d_{bg}d_{cg}d_{ah}d_{bh}d_{ch}}} \quad (3\text{-}31)$$

式中 $Z_{0(gh)}$——双地线（g、h）系统的零序阻抗，Ω/km；

d_{gh}——双地线间的距离，m；

$Z_{0(agh)}$——双地线与三相导线之间的零序互感抗，Ω/km；

d_{ag}、d_{bg}、d_{cg}、d_{ah}、d_{bh}、d_{ch}——分别为各导线与地线间距离，m。

（4）无地线的双回路线路每一回路的零序阻抗 Z_0' 计算式为

$$Z_0'=Z_0+Z_{0(\text{I II})} \quad (3\text{-}32)$$

当双回路导线型号相同时，双回路的零序阻抗为

$$Z_0'=0.5[Z_0+Z_{0(\text{I II})}] \quad (3\text{-}33)$$

$$Z_{0(\text{I II})}=0.15+\mathrm{j}0.435\lg\frac{D}{d_{m(\text{I II})}} \quad (3\text{-}34)$$

$$d_{m(\text{I II})}=\sqrt[9]{d_{aa'}d_{ab'}d_{ac'}d_{ba'}d_{bb'}d_{bc'}d_{ca'}d_{cb'}d_{cc'}} \quad (3\text{-}35)$$

式中 Z_0——单回路的零序阻抗，Ω/km，按式（3-25）计算；

$Z_{0(\text{I II})}$——第Ⅱ回路对第Ⅰ回路的零序互感阻抗；Ω/km；

$d_{m(\text{I II})}$——第Ⅰ回路导线（a、b、c）与第Ⅱ回路导线（a′、b′、c′）间的几何均距（见图 3-2），m。

（5）具有单地线的双回路线路的零序阻抗 $Z_{0(1)}'$ 计算式为

$$Z_{0(1)}'=Z_0'-\frac{Z_{0(ag)}'^2}{Z_{0(g)}} \quad (3\text{-}36)$$

$$Z_{0(ag)}'=0.15+0.435\lg\frac{D}{\sqrt[6]{d_{ag}d_{bg}d_{cg}d_{a'g}d_{b'g}d_{c'g}}} \quad (3\text{-}37)$$

式中 Z_0'——无地线的线路零序阻抗，可按式（3-32）计算；

$Z_{0(ag)}'$——导线与地线间的零序互感阻抗；

d_{ag}、d_{bg}、d_{cg}、$d_{a'g}$、$d_{b'g}$、$d_{c'g}$——分别为各导线与地线间距离，m；

$Z_{0(g)}$——地线的零序阻抗，按式（3-27）计算。

（6）具有双地线的双回路线路的零序阻抗。

当双地线与导线之间排列对称时，其零序阻抗 $Z_{0(z)}'$ 为

$$Z_{0(z)}'=Z_0'-\frac{Z_{0(agh)}'^2}{Z_{0(gh)}} \quad (3\text{-}38)$$

$$Z_{0(agh)}'=0.15+0.435\lg\frac{D}{\sqrt[6]{d_{ag}d_{bg}d_{cg}d_{ah}d_{bh}d_{ch}}} \quad (3\text{-}39)$$

式中 Z_0'——无地线的线路零序阻抗，Ω/km；

$Z_{0(gh)}$——双地线系统的零序阻抗，按式（3-30）计算；

$Z_{0(agh)}'$——双地线与导线间的零序互感阻抗，Ω/km。

地线对输电线路的零序阻抗影响较大。一般情况下，用两根钢线作地线，可增加零序电阻 10%～30%，而减少零序电抗 5%～15%。

一般情况下，输电线路零序电抗与正序电抗的平均比值见表 3-6。

表 3-6 一般输电线路零序与正序电抗的平均比值

序号	线路类别	X_0/X_1
1	无地线的单回线路	3.5
2	具有钢质地线的单回线路	3.0
3	具有良导体地线的单回线路	2.0
4	无地线的双回线路	5.5
5	具有钢质地线的双回线路	4.7
6	具有良导体地线的双回线路	3.0

3. 正序、负序和零序电容

线路的正序电容 C_1 等于负序电容 C_2。通过换位达到对称线路的正序电容（导线对中性点的电容）C_1、零序电容（导线的对地电容）C_0 及线间电容 C_{ab} 间的关系，如图 3-3 所示。本节电容单位为 F/km。

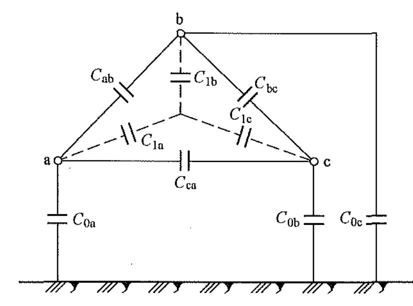


图 3-3 三相导线序电容示意图

电容 C_1、C_0 及 C_{ab} 的数值计算可以利用电位系数 p_{aa} 及 p_{ab} 表示，单位 1/F/km。按式（3-40）、式（3-41）计算。

$$p_{aa}=18\times10^6\ln\frac{2H_a}{r}=41.45\times10^6\lg\frac{2H_a}{r} \quad (3\text{-}40)$$

$$p_{ab}=18\times10^6\ln\frac{D_{ab}}{d_{ab}}=41.45\times10^6\lg\frac{D_{ab}}{d_{ab}} \quad (3\text{-}41)$$

式中 H_a、H_b——导线 a 和 b 的对地高度，m；

r——导线半径，m；

d_{ab}——导线 a 与导线 b 的距离，m，余类推；

D_{ab}——导线 a 与导线 b 的镜像间距离，m，余类推。

当三相线路导线布置对称时

$$正序电容\ C_1=\frac{1}{P_{aa}-P_{ab}}=3C_{ab}+C_0 \quad (3\text{-}42)$$

$$零序电容\ C_0=\frac{1}{P_{aa}+2P_{ab}} \quad (3\text{-}43)$$

$$线间电容\ C_{ab}=\frac{P_{ab}}{P_{aa}-P_{ab}}\times\frac{1}{P_{aa}-2P_{ab}}=\frac{C_1-C_0}{3} \quad (3\text{-}44)$$

4. 无地线线路的正序（负序）电容及正序（负序）电纳

（1）单回路线路的正序电容 C_1 为

$$C_1=\frac{0.02413\times10^{-6}}{\lg\dfrac{2H}{R_m}\dfrac{d_m}{D_m}}\approx\frac{0.02413\times10^{-6}}{\lg\dfrac{d_m}{R_m}} \quad (3\text{-}45)$$

正序电纳 b_{c1}（单位 S/km）为

$$b_{c1}=\omega C_1=\frac{7.58\times10^{-6}}{\lg\dfrac{d_m}{R_m}} \quad (3\text{-}46)$$

式中 d_m——相导线间的几何均距，m；

D_m——导线镜像间的几何均距，$D_m=\sqrt[3]{D_{ab'}D_{bc'}D_{ca'}}$；

R_m——相导线的自几何均距，可按式（3-20）计算，m。

（2）双回路线路的每回路正序电容

无地线、有单地线的双回路正序电容计算参数分别如图 3-4、图 3-5 所示。

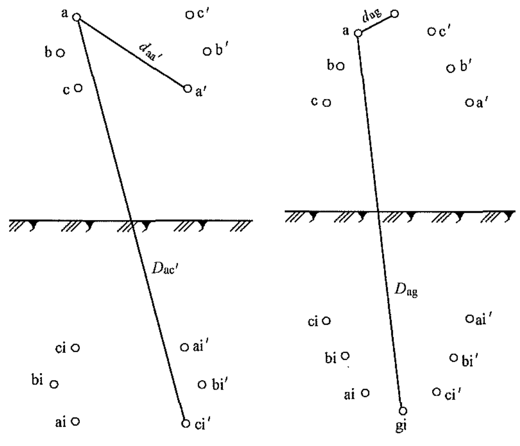


图 3-4 无地线双回路序电容计算参数图　　图 3-5 有单地线的双回路序电容计算参数图

$$C_1=\frac{0.02413\times10^{-6}}{\lg\dfrac{2H_m}{R_m}\times\dfrac{d}{D}\times\dfrac{D'}{d'}\times\dfrac{d''}{D''}} \quad (3\text{-}47)$$

$$d=\sqrt[3]{d_{ab}d_{bc}d_{ca}}$$

$$D=\sqrt[3]{D_{ab}D_{bc}D_{ca}}$$

$$D'=\sqrt[3]{D_{aa'}D_{bb'}D_{cc'}}$$

$$D''=\sqrt[6]{D_{ab'}D_{ac'}D_{ba'}D_{bc'}D_{ca'}D_{cb'}}$$

$$d'=\sqrt[3]{d_{aa'}d_{bb'}d_{cc'}}$$

$$d''=\sqrt[6]{d_{ab'}d_{ac'}d_{ba'}d_{bc'}d_{ca'}d_{cb'}}$$

式中 H_m ——三相导线对地几何平均高，m，$H_m=\sqrt[3]{H_1H_2H_3}$，H_1、H_2、H_3分别为三相导线对地高，m；

R_m ——见式（3-20）。

输电线路、输电线路（2、4 分裂）、输电线路（6、8 分裂）电纳分别见表 3-7～表 3-9。

表 3-7　　输电线路电纳　　$\times10^{-6}$/（Ω·km）

导线型号	几何均距（m）													
	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
JL/G1A-10/2	2.68	2.57	2.49	2.43	2.37	2.33								
JL/G1A-16/3	2.77	2.65	2.57	2.50	2.44	2.40								
JL/G1A-25/4	2.88	2.75	2.65	2.58	2.52	2.48								
JL/G1A-35/6	2.95	2.82	2.72	2.64	2.58	2.53								
JL/G1A-50/8	3.04	2.89	2.79	2.71	2.65	2.60								
JL/G1A-70/10	3.13	2.98	2.87	2.79	2.72	2.66	2.62	2.58						
JL/G1A-95/15	3.23	3.07	2.96	2.87	2.80	2.74	2.69	2.64	2.61	2.57	2.54			
JL/G1A-120/20	3.30	3.13	3.01	2.92	2.84	2.78	2.73	2.69	2.65	2.61	2.58			
JL/G1A-150/20	3.36	3.18	3.06	2.97	2.89	2.83	2.77	2.73	2.69	2.65	2.62			
JL/G1A-185/30			3.13	3.03	2.95	2.89	2.83	2.78	2.74	2.70	2.67	2.64	2.61	2.59
JL/G1A-210/25			3.16	3.06	2.98	2.91	2.86	2.81	2.77	2.73	2.69	2.66	2.64	2.61
JL/G1A-240/30			3.21	3.10	3.02	2.95	2.89	2.84	2.80	2.76	2.73	2.70	2.67	2.64
JL/G1A-300/40									2.85	2.81	2.77	2.74	2.71	2.68
JL/G1A-400/50									2.92	2.87	2.84	2.80	2.77	2.74
JL/G1A-500/45									2.96	2.91	2.87	2.84	2.81	2.78
JL/G1A-630/45									3.01	2.97	2.93	2.89	2.86	2.83
JL/G1A-800/55									3.08	3.04	3.00	2.96	2.92	2.89

表 3-8　　输电线路（2.4 分裂）电纳　　$\times10^{-6}$/（Ω·km）

导线型号	几何均距（m）															
	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	12.5	13.0	13.5	14.0	14.5	15.0
2×JL/G1A-300/40	3.77	3.72	3.67	3.63	3.59	3.55	3.52	3.48								
2×JL/G1A-400/50	3.83	3.78	3.73	3.68	3.64	3.60	3.57	3.53								
2×JL/G1A-500/45	3.87	3.81	3.76	3.72	3.67	3.63	3.60	3.56								
2×JL/G1A-630/45	3.92	3.86	3.81	3.76	3.72	3.68	3.64	3.61								
2×JL/G1A-800/55	3.98	3.92	3.87	3.82	3.77	3.73	3.69	3.66								
4×JL/G1A-300/40						4.45	4.40	4.35	4.30	4.25	4.21	4.17	4.13	4.10	4.07	4.03
4×JL/G1A-400/50						4.49	4.44	4.38	4.34	4.29	4.25	4.21	4.17	4.13	4.10	4.07
4×JL/G1A-500/45						4.52	4.46	4.41	4.36	4.31	4.27	4.23	4.19	4.15	4.12	4.09
4×JL/G1A-630/45						4.55	4.49	4.44	4.39	4.34	4.30	4.26	4.22	4.18	4.15	4.11
4×JL/G1A-800/55						4.59	4.53	4.48	4.43	4.38	4.34	4.29	4.25	4.22	4.18	4.15
4×JL/G3A-900/40						4.60	4.54	4.49	4.44	4.39	4.35	4.30	4.26	4.23	4.19	4.16
4×JL/G3A-1000/45						4.63	4.57	4.51	4.46	4.41	4.37	4.33	4.28	4.25	4.21	4.18
4×JL1/G3A-1250/70						4.65	4.59	4.54	4.49	4.44	4.39	4.35	4.31	4.27	4.23	4.20

表 3-9 输电线路（6、8 分裂）电纳 ×10⁻⁶/（Ω·km）

导线型号	几何均距（m）									
	24	25	26	27	28	31	32	33	34	35
6×JL/G1A-400/35	4.002	3.965	3.930	3.897	3.866					
6×JL/G1A-400/50	4.007	3.970	3.935	3.901	3.870					
6×JL/G1A-400/65	4.009	3.972	3.937	3.903	3.872					
6×JL/G1A-400/95	4.015	3.978	3.942	3.909	3.878					
6×JL/G1A-500/35	4.020	3.982	3.947	3.913	3.882					
6×JL/G1A-500/45	4.020	3.982	3.947	3.913	3.882					
6×JL/G1A-500/65	4.024	3.987	3.951	3.918	3.886					
6×JL/G1A-630/45	4.037	3.999	3.964	3.930	3.898					
6×JL/G1A-630/55	4.040	4.003	3.967	3.933	3.901					
6×JL/G1A-630/80	4.043	4.005	3.969	3.935	3.903					
6×JL/G1A-800/55	4.058	4.020	3.984	3.950	3.918					
6×JL/G1A-800/70	4.059	4.021	3.985	3.950	3.918					
6×JL/G1A-800/100	4.060	4.022	3.986	3.952	3.920					
8×JL/G1A-500/35						4.091	4.061	4.032	4.004	3.978
8×JL/G1A-500/45						4.091	4.061	4.032	4.004	3.978
8×JL/G1A-500/65						4.095	4.064	4.035	4.008	3.981
8×JL/G1A-630/45						4.104	4.074	4.045	4.017	3.990
8×JL/G1A-630/55						4.107	4.076	4.047	4.020	3.993
8×JL/G1A-630/80						4.109	4.078	4.049	4.021	3.995
8×JL/G1A-800/55						4.121	4.090	4.061	4.033	4.006
8×JL/G1A-800/70						4.121	4.090	4.061	4.033	4.006
8×JL/G1A-800/100						4.122	4.092	4.062	4.034	4.007

5. 零序电容及零序电纳的计算

（1）无地线单回路的零序电容及零序电纳。

1）零序电容 C_0 为

$$C_0=\frac{0.008043\times10^{-6}}{\lg\dfrac{D_i}{\sqrt[3]{R_m d_m^2}}} \tag{3-48}$$

$$D_i=\sqrt[9]{2H_a 2H_b 2H_c D_{ab}^2 D_{bc}^2 D_{ca}^2}$$

式中 D_i——导线 a、b、c 到其镜像间的几何均距，m；

H_a——导线 a 对地高，m，余类推；

D_{ab}——导线 a 对导线 b 镜像的距离，m，余类推；

d_m、R_m——含义同式（3-46）。

2）零序电纳 b_0（单位 S/km）为

$$b_0=\omega C_0=\frac{2.53\times10^{-6}}{\lg\dfrac{D_i}{\sqrt[3]{d_m^2 R_m}}} \tag{3-49}$$

（2）具有一根地线的单回路线路的零序电容

$$C_0=\frac{0.008043\times10^{-6}}{\lg\dfrac{D_i}{\sqrt[3]{d_m^2 R_m}}-\dfrac{\left(\lg\dfrac{D_{iag}}{d_{mag}}\right)^2}{\lg\dfrac{2H_g}{r_g}}} \tag{3-50}$$

式中 D_i、R_m、d_m——含义同式（3-46）；

D_{iag}——地线 g 至导线 a、b、c 的镜像间的几何均距，$D_{iag}=\sqrt[3]{D_{ga}D_{gb}D_{gc}}$，m；

D_{ga}——地线 g 至导线 a 的镜像间的距离，m；

d_{mag}——地线 g 至导线 a、b、c 之间的几何均距，$d_{mag}=\sqrt[3]{d_{ga}d_{gb}d_{gc}}$，m；

d_{ga}、d_{gb}、d_{gc}——地线 g 至导线 a、b、c 之间的距离，m；

H_g——地线 g 的对地高度，m；

r_g——地线 g 的半径，m。

（3）具有双地线的零序电容

$$C_0=\frac{0.008043\times10^{-6}}{\lg\frac{D_i}{\sqrt[3]{d_m^2R_m}}-\frac{2\left(\lg\frac{D_{iagh}}{d_{magh}}\right)^2}{\lg\frac{2H_{gh}}{r_g}+\lg\frac{D_{gh}}{d_{gh}}}}\tag{3-51}$$

式中 D_i、R_m、d_m、r_g——含义同式（3-50）；

D_{iagh}——地线 g 和 h 至导线 a、b、c 的镜像间的几何均距，$D_{iagh}=\sqrt[6]{D_{ga}D_{gb}D_{gc}D_{ha}D_{hb}D_{hc}}$，m；

D_{ga}——地线 g 至导线 a 的镜像间的距离，m，余类推；

d_{magh}——地线 g 和 h 至导线 a、b、c 间的几何均距，$d_{magh}=\sqrt[6]{d_{ga}d_{gb}d_{gc}d_{ha}d_{hb}d_{hc}}$，m；

d_{ga}——地线 g 至导线 a 之间的距离 m，余类推；

H_{gh}——地线 g 和 h 对地的几何平均高，$H_{gh}=\sqrt{H_gH_h}$，m；

H_g、H_h——分别为地线 g 和 h 的对地高，m；

D_{gh}——地线 g 至地线 h 镜像间的距离，m。

（4）无地线对称的双回路线路的零序电容参见图（3-4），计算式为

$$C_0=\frac{0.008043\times10^{-6}}{\lg\frac{D_i}{\sqrt[3]{d_m^2R_m}}+\lg\frac{D_{M(\text{I II})}}{d_{M(\text{I II})}}}\tag{3-52}$$

式中 D_i、R_m、d_m——含义同式（3-51）；

$D_{M(\text{I II})}$——第Ⅰ回路导线（a、b、c）对第Ⅱ回路导线（a′、b′、c′）的镜像间的几何均距 $D_{M(\text{I II})}=\sqrt[9]{D_{aa'}D_{ab'}D_{ac'}D_{ba'}D_{bb'}D_{bc'}D_{ca'}D_{cb'}D_{cc'}}$，m；

$d_{M(\text{I II})}$——第Ⅰ回路导线（a、b、c）与第Ⅱ回路导线（a′、b′、c′）间的几何均距，$d_{M(\text{I II})}=\sqrt[9]{d_{aa'}d_{ab'}d_{ac'}d_{ba'}d_{bb'}d_{bc'}d_{ca'}d_{cb'}d_{cc'}}$，m。

（5）具有单地线对称的双回路线路的零序电容见图 3-5，计算式为

$$C_0=\frac{0.008043\times10^{-6}}{\lg\frac{D_i}{\sqrt[3]{d_m^2R_m}}+\lg\frac{D_{M(\text{I II})}}{d_{M(\text{I II})}}-2\frac{\left(\lg\frac{\sqrt[3]{D_{ag}D_{bg}D_{cg}}}{\sqrt[3]{d_{ag}d_{bg}d_{cg}}}\right)^2}{\lg\frac{2H_g}{r_g}}}\tag{3-53}$$

式中 D_{ag}、D_{bg}、D_{cg}——地线 g 至导线 a、b、c 的镜像的距离，m；

d_{ag}、d_{bg}、d_{cg}——地线 g 至导线 a、b、c 间的距离，m；

H_g——地线 g 的对地高度，m；

r_g——地线 g 的半径，m。

（6）具有双地线对称的双回路线路的零序电容见图 3-6，计算式为

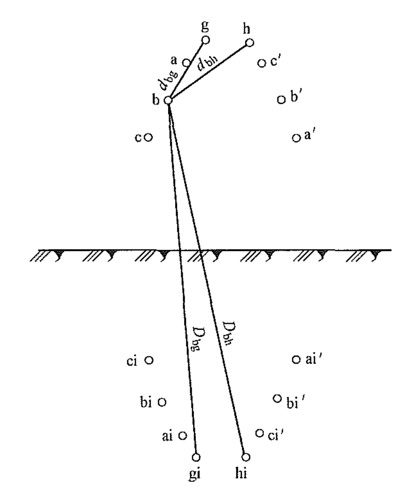


图 3-6　有双地线的双回路序电容计算参数图

$$C_0=\frac{0.008043\times10^{-6}}{\lg\frac{D_i}{\sqrt[3]{d_m^2R_m}}+\lg\frac{D_{M(\text{I II})}}{d_{M(\text{I II})}}-2\left[\frac{2\left(\lg\frac{D_{iagh}}{d_{magh}}\right)^2}{\lg\frac{2H_g}{r_g}+\lg\frac{D_{gh}}{d_{gh}}}\right]}\tag{3-54}$$

式中 D_{iagh}——地线 g 和 h 至导线 a、b、c、a′、b′、c′的镜像间的几何均距，$D_{iagh}=\sqrt[12]{D_{ag}D_{bg}D_{cg}D_{a'g}D_{b'g}D_{c'g}D_{ah}D_{bh}D_{ch}D_{a'h}D_{b'h}D_{c'h}}$，m；

d_{magh}——地线 g 和 h 至导线 a、b、c、a′、b′、c′间的几何均距，$d_{magh}=\sqrt[12]{d_{ag}d_{bg}d_{cg}d_{a'g}d_{b'g}d_{c'g}d_{ah}d_{bh}d_{ch}d_{a'h}d_{b'h}d_{c'h}}$，m；

D_{gh}——地线 g 与地线 h 的镜像距离，m；

d_{gh}——地线 g 与 h 间的距离，m。

三、输电线路的波阻抗和自然功率

交流输电线路的电阻与其电抗和容抗相比通常是很小的，可以忽略不计。忽略线路电阻后波阻抗 Z_n 变为

$$Z_n=\sqrt{\frac{X_1}{b_1}}=\sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \tag{3-55}$$

式中　X_1、b_1——分别为线路正序电抗和电纳；

L_1、C_1——分别为线路的正序电感和电容。

线路的自然功率 P_n 为

$$P_n=U^2/Z_n \tag{3-56}$$

式中　U——线路电压，kV。

线路输送自然功率时的特性是：沿全线的电压和电流值均保持不变，即送端和受端的电压和电流相等；其次，线路产生的无功和消耗的无功互相抵消。线路输送的功率大于自然功率时，送端电压高于受端电压，线路的无功损耗需由系统供给。当输送功率小于自然功率时，送端电压低于受端电压，线路产生无功供给系统。

四、导线表面的电场强度

为了预计超高压和特高压线路的电晕放电现象（无线电干扰、可听噪声和电晕损失），需要知道输电线路导线表面的电场分布。用于计算分裂导线表面场强和地面场强的方法很多，目前采用较多的是基于求取等效半径的马克特—门得尔法（Markt and Mendel），其特点是简洁明了，计算速度快，并对于四分裂及以下导线具有足够精确度（误差不大于 2%），但计算四分裂以上导线时精度降低，而且不能对导线布置方式进行详细研究。

为了精确分析分裂导线表面及其周围空间的电场分布形态，必需借助于数字计算，目前采用较多的方法有逐次镜像法（Successive Images）、模拟电荷法（Simulator Charges）和矩量法（Moment Methods）等。不论哪种方法，计算时均做如下假定：

1）大地为无穷大导体平面；

2）导线为相互平行同时与地面平行的无限长光滑圆柱形导体；

3）导线支撑物（包括铁塔、金具和绝缘子等）及任何其他邻近物体的影响可忽略不计；

4）导线间水平间距为常数，导线高度为平均对地高度或弧垂最低点高度。

经上述假定，求解输电线路导线表面及地面场强的问题可转化为两维电场的求解问题，即位于零位面上平行多导体系统的电场求解问题。

（一）马克特—门得尔法

就高压输电线路来说，导线相间及与地面之间的距离通常比导线直径大得多。因此，认为导线上电荷位于导线中心的近似方法是实用的。对于相分裂导线，这个方法仍可采用。而其表面电场的变化，当子导线是对称排在一个圆周上时，则可用下面所述的余弦定律来表示。

每根导线的电荷量可根据麦克斯维尔电位系数法求得

$$[\boldsymbol{Q}]=[\boldsymbol{P}]^{-1}[\boldsymbol{U}] \tag{3-57}$$

式中　$[\boldsymbol{Q}]$——单位长度导线电荷列向量；

$[\boldsymbol{P}]$——电位系数矩阵；

$[\boldsymbol{U}]$——导线对地电位列向量。

电位系数由式（3-11）、式（3-12）求得。

对于接地良好的架空地线，电位为零，所以地线相关的行和列可以直接消去。分裂导线以等效半径代替。则导线各相的表面电场强度有效值 E（单位 mV/m）为

$$\begin{aligned}E&=\frac{Q}{2\pi\varepsilon r}=\frac{C_1U_L}{2\pi\varepsilon r\sqrt{3}}\\&=0.001039\times\frac{C_1U_L}{r}\end{aligned} \tag{3-58}$$

式中　U_L——线电压，kV；

C_1——相导线工作（或称正序）电容，pF/m；

r——导线半径，cm。

若用电场强度最大值 E_m 表示，则式（3-58）变为

$$E_m=0.00147\times\frac{C_1U_L}{r} \tag{3-59}$$

对于分裂导线，其单根导线的平均电场强度为

$$\bar{E}=0.001039\times\frac{C_1U_L}{nr} \tag{3-60}$$

$$\bar{E}_m=0.00147\times\frac{C_1U_L}{nr} \tag{3-61}$$

式中　$\bar{E}$——平均电场强度有效值，kV；

$\bar{E}_m$——平均电场强度最大值，kV；

n——分裂导线根数。

如图 3-7 给定的参数，沿导线圆周表面的电场强度为

$$E_\theta=\bar{E}\times\left[1+2(n-1)\frac{r}{s}\sin\frac{\pi}{n}\cos\theta\right] \tag{3-62}$$

式中　$\bar{E}$、n、r 含义同式（3-60）。

圆周表面的最大电场强度有效值为

$$E_\theta=\bar{E}\times\left[1+2(n-1)\frac{r}{s}\sin\frac{\pi}{n}\right] \tag{3-63}$$

式（3-58）～式（3-61）中的电容 C_1 可用式（3-42）和式（3-45）计算，但计算出的是三相平均电容，不能反映各相导线的电场强度。

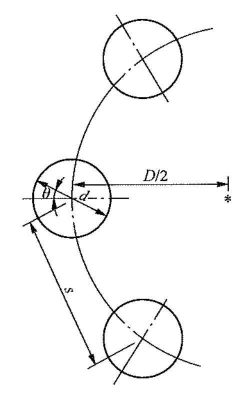
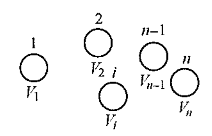


图 3-7 相分裂导线的几何图形

（二）逐次镜像法

逐次镜像法的基本原理是，以维持各导线表面成等电位面为边界条件，在各导线内逐次放置镜像电荷。这样多导线系统中每根导线上的分布电荷可被一系列的点电荷等效表示。由于每次镜像过程都使系统中每根导线的表面向等电位面趋近一步，当某次镜像后也得到达到满足精度要求的结果时，逐次镜像过程即可结束。

图 3-8 所示的导线系统中，各导线对地电位和表面电荷分别假定为 V_1、V_2、…、V_n 和 q_1、q_2、…、q_n，大地的影响用镜像电荷来等效，其电位和电荷分别为 $-V_1$、$-V_2$、…、$-V_n$ 和 $-q_1$、$-q_2$、…、$-q_n$，因此地面之上的导线被 $2n$ 根导线的等效系统取代。



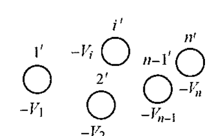


图 3-8 导线系统及其等效表示

每根导线上的电荷，都可以用所有其他导线上的电荷来表示，在放置这些电荷时，要求能使被考虑的导线表面成为一个等位面。如第 i 根导线，经第一次镜像后的所有镜像电荷如图 3-9 所示。导线上的镜像电荷总个数为（$2n-1$），这些电荷的代数和仍为 q_i。依此类推，当第一次镜像结束后，每根导线上都有（$2n-1$）个电荷。

第二次镜像时，由于每根导线上的电荷都被（$2n-1$）个等效电荷所表示，所以当镜像过程结束时，每根导线上的电荷都被（$2n-1$）^{2} 个镜像电荷所取代。当计算精度一定时，镜像次数决定于各导线之间的距离与导线半径之比，比值越大，镜像次数越少。当该比值大于 10 时，只镜像一次就能使误差小于 0.2%。对于输电线路来说，分裂间距与导线半径之比一般均超过 20，故只进行一次镜像便能满足精度要求。

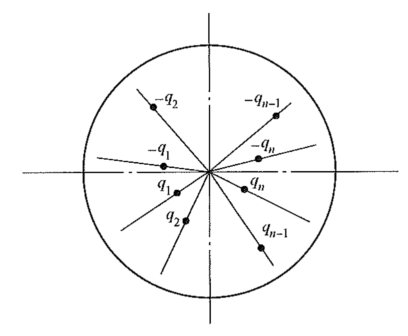


图 3-9 第 i 根导线的第一次镜像

如图 3-10 所示，第一次镜像时，镜像电荷的位置 d_{ij} 由式（3-64）确定，即

$$d_{ij} = r_i^2 / D_{ij} \tag{3-64}$$

式中 r_i ——第 i 根导线半径；

D_{ij} ——第 i 根导线到第 j 个电荷的距离。

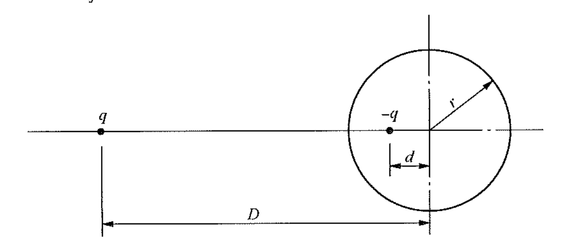


图 3-10 平行于圆柱导体的线电荷

每根导线的电荷量可根据麦克斯维尔电位系数法式（3-57）求得，求得镜像电荷及其位置坐标后，便可计算空间任意一点的电位和电场强度。设 (X_0, Y_0) 为待求点的坐标，(X_i, Y_i) 为 i 电荷点的坐标，(X_0, Y_0) 点的电场为各镜像电荷在该点所产生电场的矢量和，其中由实部电荷和虚部电荷产生的场强的垂直分量 E_{RV} 和 E_{IV} 分别为

$$\left.\begin{aligned} E_{RV} &= \sum_{i=1}^{n(2n-1)} \frac{QR_i}{2\pi\varepsilon_0} \times \left[\frac{Y_i - Y_0}{(Y_i - Y_0)^2 + (X_i - X_0)^2} + \frac{Y_i + Y_0}{(Y_i + Y_0)^2 + (X_i - X_0)^2}\right] \\ E_{IV} &= \sum_{i=1}^{n(2n-1)} \frac{QI_i}{2\pi\varepsilon_0} \times \left[\frac{Y_i - Y_0}{(Y_i - Y_0)^2 + (X_i - X_0)^2} + \frac{Y_i + Y_0}{(Y_i + Y_0)^2 + (X_i - X_0)^2}\right] \end{aligned}\right\} \tag{3-65}$$

这样该点的垂直分量为

$$E_V = \sqrt{E_{RV}^2 + E_{IV}^2} \tag{3-66}$$

由实部电荷和虚部电荷在该点产生的场强的水平分量 E_{RH} 和 E_{IH} 分别为

$$\left.\begin{aligned} E_{RH} &= \sum_{i=1}^{n(2n-1)} \frac{QR_i}{2\pi\varepsilon_0} \times \left[\frac{X_0 - X_i}{(Y_i - Y_0)^2 + (X_i - X_0)^2} - \frac{X_0 - X_i}{(Y_i + Y_0)^2 + (X_i - X_0)^2}\right] \\ E_{IH} &= \sum_{i=1}^{n(2n-1)} \frac{QI_i}{2\pi\varepsilon_0} \times \left[\frac{X_0 - X_i}{(Y_i - Y_0)^2 + (X_i - X_0)^2} - \frac{X_0 - X_i}{(Y_i + Y_0)^2 + (X_i - X_0)^2}\right] \end{aligned}\right\} \tag{3-67}$$

该点场强的水平分量 E_H 为

$$E_H = \sqrt{E_{RH}^2 + E_{IH}^2} \tag{3-68}$$

对于导线表面各点的电场强度可直接按式（3-67）求得。

$$E = \sqrt{E_V^2 + E_H^2} \tag{3-69}$$

第二节 导线选择及载流量计算

架空输电线路导线选择主要从电气性能（载流量、电流密度、导线表面电场强度、无线电干扰、可听噪声、电能损失等）、机械性能（机械特性、负荷特性等）、综合经济性能等方面对各种导线分裂型式和截面进行分析选择。一般情况下，在导线选择时，首先按线路输送容量和经济电流密度确定导线总截面，并按其允许载流量满足线路的最大输送容量进行校核，然后对不同导线分裂型式进行线路电气性能和机械性能（见第五章）的计算比较，最后通过综合技术经济比较确定。

一、按经济电流密度选择导线截面

按经济电流密度选择导线截面采用的输电容量，应考虑线路投入运行后5～10年或更远景的发展。

按经济电流密度选择导线截面的计算公式如下：

$$S = \frac{P}{\sqrt{3} J U_n \cos\varphi} \tag{3-70}$$

式中 S——导线截面，mm^2；

P——输电容量，kW；

U_n——线路的额定电压，kV；

J——经济电流密度，A/mm^2。

目前仍沿用1956年原电力部颁布的经济电流密度，其值见表3-10。由于导线经济电流密度与国家不同时期的经济政策、材料价格、生产水平、电能成本及线路特点等密切相关，因此在不同历史时期，需要对经济电流密度做必要的修订。随着我国国民经济的发展，输电线路各部件（导线、金具、绝缘子、杆塔和基础）等材料价格的提高，输电线路最大负荷利用小时数和销售电价的改变，以及国家节能减耗要求，近年来经济电流密度的取值有下降的趋势。

表3-10 经济电流密度 A/mm^2

导线材料	最大负荷利用小时数 T_{max}（h）		
	3000以下	3000～5000	5000以上
铝线	1.65	1.15	0.9
铜线	3.0	2.25	1.75

二、导线允许载流量的计算方法

电力系统事故（一般为相关线路 $N-1$）情况下，非故障线路的导线在满足热稳定条件下所允许的最大工作电流，称为导线的允许载流量。导线允许载流量是在给定环境条件下，在导线上引起给定最高允许温度的最大稳态电流。导线的载流量与导线的允许温度、环境温度、风速、日照强度、导线表面状态、辐射系数及吸热系数、空气的传热系数和动态黏度等因素等有关。对于确定的环境条件，导线的允许载流量直接取决于其发热允许温度，允许温度越高，允许载流量越大。但是导线发热允许温度受导线载流发热后的强度损失制约，因此架空导线的允许载流量一般是按一定气象条件下导线不超过某一温度来计算的，目的在于尽量减少导线的强度损失，以提高或确保导线的使用寿命。

架空导线允许载流量可按导线的发热和散热的热平衡原理计算，可采用GB 50545—2010《110kV～750kV架空输电线路设计规范》条文说明中的公式计算，公式见式（3-71）。

$$I = \sqrt{(W_R + W_F - W_S) / R_t'} \tag{3-71}$$

式中 I——允许载流量，A；

W_R——单位长度导线的辐射散热功率，W/m；

W_F——单位长度导线的对流散热功率，W/m；

W_S——单位长度导线的日照吸热功率，W/m；

R_t'——允许温度时导线的交流电阻，Ω/m。

辐射散热功率 W_R 的计算式为

$$W_R = \pi D E_1 S_1 \times [(t+273)^4 - (t_a+273)^4] \tag{3-72}$$

式中 D——导线外径，m。

E_1——导线表面的辐射散热系数，光亮的新线为0.23～0.43；旧线或涂黑色防腐剂的线为0.90～0.95。

S_1——斯特凡-包尔茨曼常数，为 $5.67\times10^{-8}W/m^2$。

t——导线允许温度，℃。

t_a——环境温度，℃。

验算导线允许载流量时，导线的允许温度：钢芯铝绞线和钢芯铝合金绞线一般采用+70℃，必要时可采用+80℃；大跨越可采用+90℃；钢芯铝包钢绞线（包括铝包钢绞线）可采用+80℃（大跨越可采用+100℃），或经试验决定；镀锌钢绞线可采用+125℃。环境气温宜采用最热月平均最高温度；风速采用0.5m/s（大跨越采用0.6m/s）；太阳辐射功率密度采用1000W/m²。

对流散热功率 W_F 的算式为

$$W_F = 0.57\pi\lambda_f \times (t - t_a) R_e^{0.485} \quad (3-73)$$

式中 λ_f——导线表面空气层的传热系数，W/(m·℃)；

R_e——雷诺数。

$$\lambda_f = 2.42 \times 10^{-2} + 7 \times [(t_a + t)/2] \times 10^{-5} \quad (3-74)$$

$$R_e = vD/\upsilon \quad (3-75)$$

式中 v——垂直于导线的风速，m/s；

υ——导线表面空气层的运动粘度，m²/s；

$$\upsilon = 1.32 \times 10^{-5} + 9.6 \times [(t_a + t)/2] \times 10^{-8} \quad (3-76)$$

日照吸热功率 W_s 的算式为

$$W_s = \alpha_s J_s D \quad (3-77)$$

式中 α_s——导线表面的吸热系数，光亮的新线为0.35～0.46；旧线或涂黑色防腐剂的线为0.9～0.95；

J_s——日光对导线的日照强度，W/m²；当晴天、日光直射导线时，可采用1000W/m²。

环境气温采用最热月平均最高温度，指最热月每日最高温度的月平均值，取多年平均值，由当地气象资料整理得出，其参考数据见表3-11，常用钢芯铝绞线允许载流量见表3-12。

表3-11　各地最热月平均气温　℃

地名	最热月平均气温	地名	最热月平均气温	地名	最热月平均气温
哈尔滨	27.7	重庆	32.7	武汉	33.8
长春	27.9	昆明	23.9	厦门	32.1
海拉尔	25.4	济南	32.3	广州	32.2
北京	31.1	合肥	32.6	贵阳	28.5
沈阳	29.3	南京	32.5	南宁	33.5
太原	29.9	上海	31.7	呼和浩特	28.0
西安	30.9	杭州	33.9	乌鲁木齐	32.3
天津	30.6	长沙	34.1	南昌	34.0
大同	28.2	拉萨	21.8	银川	29.4
神木	30.8	哈密	34.8	准格尔	29.7

注　该表摘自《电力系统规划设计技术》一书。

表3-12　常用钢芯铝绞线允许载流量　A

标称截面 铝/钢 (mm²)	结构，根数/直径 (mm)		外径 (mm)	直流电阻 (Ω/km)	环境温度25℃ 导线载流量		环境温度35℃ 导线载流量	
	铝	钢			70℃	80℃	70℃	80℃
50/30	12/2.32	7/2.32	11.60	0.5693	234	263	199	233
70/40	12/2.72	7/2.72	13.6	0.4141	250	275	225	250
95/15	26/2.15	7/1.67	13.61	0.3058	332	374	281	331
95/20	7/4.16	7/1.85	13.87	0.3019	335	378	284	335
95/25	12/3.20	7/3.20	16	0.2992	349	394	295	349
120/7	18/2.90	1/2.90	14.5	0.2422	379	427	321	378
120/20	26/2.38	7/1.85	15.07	0.2496	377	425	319	376
120/25	7/4.72	7/2.10	15.74	0.2345	393	444	332	393
120/70	12/3.60	7/3.60	18	0.2364	404	458	341	405

续表

标称截面 铝/钢 (mm²)	结构，根数/直径 (mm)		外径 (mm)	直流电阻 (Ω/km)	环境温度25℃ 导线载流量		环境温度35℃ 导线载流量	
	铝	钢			70℃	80℃	70℃	80℃
150/8	18/3.20	1/3.20	16	0.1989	428	484	362	428
150/20	24/2.78	7/1.85	16.67	0.198	433	490	366	434
150/25	26/2.70	7/2.10	17.1	0.1939	441	499	372	441
150/35	30/2.50	7/2.50	17.5	0.1962	441	499	372	441
185/10	18/3.60	1/3.60	18	0.1572	495	561	418	496
185/25	24/3.15	7/2.10	18.9	0.1542	506	574	427	507
185/30	26/2.98	7/2.32	18.88	0.1592	498	565	420	499
185/45	30/2.80	7/2.80	19.6	0.1564	508	576	427	509
210/10	18/3.80	1/3.80	19	0.1411	530	601	446	531
210/25	24/3.33	7/2.22	19.98	0.138	543	616	456	544
210/35	26/3.22	7/2.50	20.38	0.1363	549	623	461	550
210/50	30/2.98	7/2.98	20.86	0.1381	548	623	461	550
240/30	24/3.60	7/2.40	21.6	0.1181	598	680	502	600
240/40	26/3.42	7/2.66	21.66	0.1209	592	672	496	593
240/55	30/3.20	7/3.20	22.4	0.1198	599	682	503	601
300/15	42/3.00	7/1.67	32.01	0.09724	726	833	602	731
300/20	45/2.93	7/1.95	23.43	0.0952	679	773	569	682
300/25	48/2.85	7/2.22	23.76	0.09433	672	764	563	674
300/40	24/3.99	7/2.66	23.94	0.09614	680	774	569	682
300/50	26/3.83	7/2.98	24.26	0.09636	681	776	570	684
300/70	30/3.60	7/3.60	25.2	0.09463	694	792	580	697
400/20	42/3.51	7/1.95	26.91	0.07104	812	927	677	816
400/25	45/3.33	7/2.22	26.64	0.0737	795	909	664	800
400/35	48/3.22	7/2.50	26.82	0.07389	782	892	653	786
400/50	54/3.07	7/3.07	27.63	0.07232	796	909	665	801
400/65	26/4.42	7/3.44	28	0.07236	814	930	678	818
400/95	30/4.16	19/2.50	29.14	0.07087	831	951	691	836
500/35	45/3.75	7/2.50	30	0.05812	921	1055	766	927
500/45	48/3.60	7/2.80	30	0.05912	898	1027	748	904
500/65	54/3.44	7/3.44	30.96	0.0576	917	1050	763	924
630/45	45/4.20	7/2.80	33.6	0.04633	1040	1193	863	1049
630/55	48/4.12	7/3.20	34.32	0.04514	1059	1216	879	1069
630/80	54/3.87	19/2.32	34.82	0.04551	1060	1218	879	1070
720/50	45/4.53	7/3.02	36.23	0.03984	1140	1311	944	1151
800/55	45/4.80	7/3.20	38.4	0.03547	1222	1408	1010	1235
800/70	48/4.63	7/3.60	38.58	0.03574	1220	1406	1008	1233
800/100	54/4.33	19/2.60	38.98	0.03635	1216	1403	1002	1229

注 计算条件：日照 1kW/m²，风速 0.5m/s，导线表面黑度 0.93。

三、影响导线载流量的因素

影响导线载流量的因素，一部分为外界环境条件，如风速、日照强度、环境温度等，这是与输电线路所处的自然条件有关。另一部分是与导线有关的，如导线的吸热系数、辐射系数、导线允许温度、导线直径等。

当导线直径（截面）一定时，导线允许温度的取值就成为影响载流量的主要因素。导线的吸热、辐射系数综合影响载流量较小。

风速对导线载流量影响很大：$v=0.5$m/s 比 $v=0.1$m/s 时的载流量要大 40%，而 $v=1.0$m/s 比 $v=0.5$m/s 时的载流量要增大 15%～20%。

导线表面辐射系数和表面的吸热系数，主要是由导线的新旧决定，虽然它们各自对导线载流量有一定影响，而且影响是相反的，它们对导线载流量的综合影响要小得多，在导线使用温度范围内，大约为 1%～2%。

四、年费用最小法

全寿命周期费用包括初投资、运行维护检修费、设备更新改造费以及事故损失等各项费用。全寿命周期费用决策应考虑资金的时间价值，用动态的观点予以考虑。线路工程一般采用最小费用法进行动态分析比较，即将初投资费用、运行维护检修费用、设备更新改造费用以及事故损失费用都按规定的设备年限（或整个线路工程的服务年限），并考虑利息、年偿债基金率等折算为现值，或折算为等额年费用，选用费用最小者为经济方案。年费用最小法，计算公式为

$$NF = Z\times\left[\frac{r_0(1+r_0)^n}{(1+r_0)^n-1}\right]+u \quad (3\text{-}78)$$

$$Z=\sum_{t=1}^{m} Z_t\times(1+r_0)^{m+1-t} \quad (3\text{-}79)$$

$$u=\frac{r_0(1+r_0)^n}{(1+r_0)^n-1}\times\left[\sum_{t=t'}^{t=m}u_t\times(1+r_0)^{m-t}+\sum_{t=m+1}^{t=m+n}u_t\times\frac{1}{(1+r_0)^{t-m}}\right] \quad (3\text{-}80)$$

式中 NF——年费用（平均分布在 $m+1$ 到 $m+n$ 期间的 n 年内）；

Z_t——折算到第 t 年的投资，$t=1, 2, \cdots, m$；

Z——折算到第 m 年的总投资；

u——折算年运行费用；

m——施工年数；

n——经济使用年数；

t——从工程开工这一年起的年份；

t'——工程部分投产的年份；

r_0——电力工程投资的回收率。

第三节　交　流　电　晕

电极间距离很大时，由于电场极不均匀，在电极表面及其附近的电场强度超过空气的击穿强度时，在电极表面就出现放电现象。或者说电极表面及附近产生局部击穿的放电现象叫电晕。不论在均匀还是不均匀电场中空气的击穿强度都受许多条件的影响，如空气压力、电极材料、水蒸气的存在、光游离和电压的类型等。电极表面的不规则性，如脏污的微粒、突出的毛刺等都会引起电场强度集中而形成电晕放电。电晕放电将产生光、可听噪声、无线电杂音、导线振动、臭氧和其他生成物，同时还产生电能损失。对电晕（特别是输电线路电晕）问题，各国经长期的研究，已经基本掌握了其规律。

一、导线表面状况和大气条件对电晕的影响

（一）导线表面状况的影响

220kV 及以下输电线路导线的电场强度一般较低。但是 220kV 以上的超高压输电线路，由于经济上的考虑，通常导线的电场强度在正常运行时为起始电晕强度的 80%左右，接近于起始电晕强度；而新架设的线路，导线表面有许多明显的不规则处，电晕起始电压较低，故新导线的电晕损失，无线电干扰和可听噪声将较大。表面不规则处电晕形成的自由电荷引起的局部离子轰击，能磨蚀掉导线表面的毛刺，而且能帮助除去表面的污秽物和其他好天气下的电晕源。

一些超高压试验基地所获得的资料表明，新导线大约经过 6 个月后，电晕损失明显减小。观察到导线在很低的运行强度下也产生老化，这表明，在比运行电压低，甚至不加电压的情况下，只要导线受到天气的作用就会老化。从数量上来讲，老化导线在大雨天的电晕损失可减少 25%～33%，有露水时也有类似的减少；在老化 32 个月以后，无线电干扰电平降低 25%。用了数年经过风吹雨打已老化的导线，其电晕损失、可听噪声和无线电干扰都较小，而且产生强烈电晕放电的点源也较少。但是，当线路停电几天后重新带电时，在头 15～20min 内，电晕损失会暂时增加。

根据观察，老化的导线具有亲水性，会将表面水滴吸入到各股线之中，而新导线是憎水性的，则有较多的水滴停留在导线表面。因此，在有雨滴情况下新导线电晕严重，并可看到水滴上有微弱的辉光。

美国蒂德试验基地的试验说明，涂油脂的导线一般要比人工老化（喷砂处理）的导线有较大的电晕损失、无线电干扰和可听噪声。

（二）大气条件的影响

大气条件，诸如空气密度、湿度、风、降雨、降

雪及降霜等都以各种方式影响着电晕的产生。

空气密度和相对湿度影响着电晕起始电场强度。空气密度和相对湿度的增大提高了电晕起始电场强度，就相当于电晕放电水平减低。

风增加了正极性流注的活跃性，因为负半周产生的空间电荷被吹掉。当无风时，该空间电荷将减弱电晕源的表面电场强度，从而抑制了正极性流注的形成。

雨、雪、霜、雾等降落时，这些小的质点经过导线引起导线对质点放电，这时也会发生电晕放电。其放电方式为：质点临近导线时引起局部电场畸变，由于感应作用，质点两端呈现偶极子电荷分布，这种电荷使电场强度增加而引起放电。试验表明，降雨、雪、霜、雾时都不同程度地使电晕损失显著增加。

也有人认为，超高压输电线路在好天气下产生电晕主要是空中降落物质，诸如昆虫、灰尘、蜘蛛网、树叶、鸟粪和其他非金属物。而大气条件也对导线上好天气的电晕源的性质有影响，因而改变了电晕特性。

二、导线的电晕临界电场强度

实验证明，临界电场强度与极性的关系很小。在磨光的导线上负极性的临界电场强度略高一点，但是在线路常用的导线直径范围（1～5cm）内差别极小，可取相同的值。

根据试验数据确立的皮克公式，对同轴圆筒及平行导线，其临界电场强度最大值 E_{m0} 为

$$E_{m0}=3.03m\delta^{\frac{2}{3}}\times\left(1+\frac{0.3}{\sqrt{r}}\right) \qquad (3\text{-}81)$$

$$\delta=289\times10^{-5}\times\frac{p}{273+t}$$

式中 m——导线表面系数，对绞线一般可取 0.82；

δ——相对空气密度；

p——气压，Pa；

t——气温，℃；

r——导线半径，cm。

当 $p=101.325\times10^3$Pa，$t=20$℃，$\delta=1$ 时，则式（3-81）变为

$$E_{m0}=3.03m\times\left(1+\frac{0.3}{\sqrt{r}}\right) \qquad (3\text{-}82)$$

GB 50545—2010 规定海拔不超过 1000m 地区，钢芯铝绞线外径不小于表 3-13 所列数值，可不必验算电晕。

表 3-13 可不必验算电晕的导线最小外径（海拔不超过 1000m）

额定电压（kV）	110	220	330			500			750		
导线外径（mm）	9.6	21.6	33.6	2×21.6	3×17.1	2×36.24	3×26.82	4×21.6	4×36.9	5×30.2	6×25.5

第四节 电 能 损 失

输电线路的电能损失主要包括导线电阻损失、导线电晕损失、地线电晕损失及绝缘子金具串泄漏损失等，地线电晕损失和绝缘子金具泄漏损失较小，可忽略不计。本节主要论述电阻损失、导线电晕。

一、电阻损失

（一）交流电阻的计算

电阻反映了线路通过电流时产生有功功率的损失效应，有色金属导线单位长度的直流电阻 R 可以按照式（3-83）计算，即

$$R=\rho/S \qquad (3\text{-}83)$$

式中 ρ——导线的电阻率，Ω·mm²/km；

S——导线载流部分的标称截面积，mm²。

但是在实际的工程计算中，往往不用上面介绍的公式计算，通过查询导线规格资料，可以直接得到导线的直流电阻的大小，经过修正就可以得到所使用的交流电阻。这里修正该参数需要考虑两个方面的影响。

由于通过导线的是三相工频交流电流，考虑集肤效应和邻近效应，交流电阻比直流电阻略大。当交变电流通过导体时，电流将集中在导体表面流过，这种现象称为集肤效应。如电力系统输电线路所使用的导线是多股导线绞合而成，在输电工作时，集肤效应使电流聚集于总导体表层，而非平均分布于整个导体的截面积中。而相邻导线流过高频电流时，由于磁电作用使电流偏向一边的特性，称为邻近效应，该效应的存在使电流集中在多股导体交界面流动。但是由于电网基波电流频率为 50Hz，邻近效应和集肤效应导致的电阻变化是有限的，但是需要修正。由于输电线路使用的导线多为多股绞线，导体的实际线长比导线的标称长度长 2%～3%；在制造导线的过程中，导线的实际截面常常比标称截面略小。这也会导致导线电阻值的变化。

对应于使用温度 t 时的直流电阻 R_{DC} 按式（3-84）计算得出，即

$$R_{DC(t)}=R_{DC(20)}\times[1+\alpha(t-20)] \qquad (3\text{-}84)$$

式中 $R_{DC(t)}$——温度 t 时的直流电阻，Ω/km；

$R_{DC(20)}$——温度 20℃时的直流电阻，Ω/km；

α——电阻温度系数（1/℃），不同材料的电阻温度系数见表 3-14。

表 3-14　不同材料导体电阻温度系数

材料	导电率（% IACS）	电阻温度系数（1/℃）
硬铝	61	0.00403
	61.5	0.00406
铝包钢	20.3	0.0036
	30	0.0038
	40	0.0040
铝合金	52.5	0.00347
	53.5	0.00353

注　%IACS 是导电率试样电导率与某一标准值的比值的百分数称为该试样的导电率，导电率（%IACS）＝ $0.017241/\rho\times100\%$。

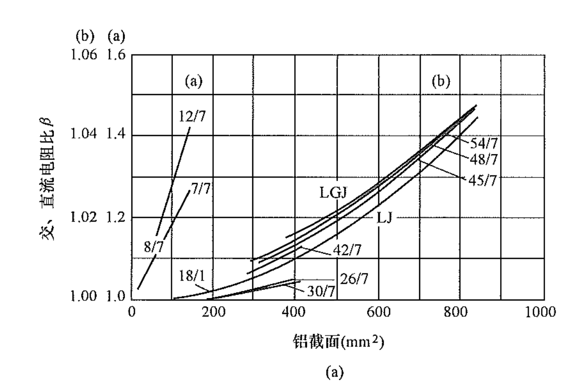
导线的交流电阻与导线的结构、集肤效应、邻近效益、钢芯的磁通和温度等因素有关。不同温度、不同导线结构的交直流电阻比如图 3-11 所示，交流电阻按式（3-85）计算。

$$R_{AC}=\beta\cdot R_{DC} \quad (3\text{-}85)$$

式中：β 为交直流电阻比，在交流情况下，考虑如下所示的集肤效应系数 K_1 和铁芯损耗系数 K_2 所形成的交直流电阻比 β。

$$\beta=K_1\cdot K_2 \quad (3\text{-}86)$$

β 取值见图 3-11，K_1 及 K_2 的选取见表 3-15，也可采用日本电线与电缆制作者协会颁发的标准 JCS 0374：2003《裸线载流量计算方法》中的计算方法。



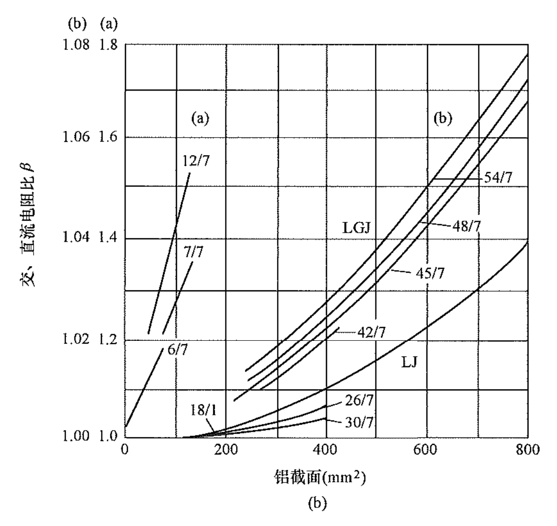


图 3-11　不同导线结构的交直流电阻比
（a）导线温度 70℃；（b）导线温度 80℃

表 3-15　交直流电阻比 β

<table>
<tr><th colspan="3">种类</th><th>集肤效应系数 K_1</th><th>铁芯损耗系数 K_2</th><th>交直流电阻比 β</th></tr>
<tr><td rowspan="2">单绞线</td><td colspan="2">铜绞线</td><td rowspan="2">$K_1=0.99609+0.018578x-0.030263x^2+0.020735x^3$ ①
$x=0.01\times\sqrt{8\pi f/R_{DC}}$
式中：f 为频率，Hz</td><td rowspan="2">$K_2=1$</td><td rowspan="2">$\beta=K_1\cdot K_2$</td></tr>
<tr><td colspan="2">铝绞线</td></tr>
<tr><td rowspan="3">成绞线</td><td rowspan="3">铝线＋钢线</td><td>铝 1 层</td><td></td><td></td><td>以实测值 K 为准</td></tr>
<tr><td>铝偶数层</td><td rowspan="2">$K_1=0.99609+0.018578x-0.030263x^2+0.020735x^3$ ①
$x=0.01\times[(D_1+2D_2)/(D_1+D_2)]\times\sqrt{8\pi f(D_1-D_2)/[(D_1+D_2)R_{DC}]}$
式中：D_1 为 ACSR 系电线外径，cm；D_2 为 ACSR 系钢芯外径，cm</td><td>$K_2=1$</td><td>$\beta=K_1\cdot K_2$</td></tr>
<tr><td>铝 3 层以上奇数层</td><td>$K_2=0.99947+0.028895y-0.0059348y^2+0.00042259y^3$ ②
式中：$y=I/S$，I 为电流，S 为铝截面</td><td>$\beta=K_1\cdot K_2$</td></tr>
</table>

① 根据本式得出的 K_1 计算结果不足 1.0 时，$K_1=1$；
② 根据本式得出的 K_2 计算结果不足 1.0 时，$K_2=1$。

（二）电阻损耗

电阻损耗公式如下：

$$W=3I^2Rt \quad (3\text{-}87)$$

式中　W——电阻损失，W·h/m；
I——额定功率下的相导线运行电流，A；
R——额定功率和年平均温度下的相导线电阻

值，Ω/m；

t——年最大损耗小时数。

损耗小时数 t 与最大负荷利用小时数 T_{max} 的关系见表3-16。

表3-16　损耗小时数 t 与最大负荷利用小时数 T_{max} 的关系　　h

T_{max}	cos φ				
	0.8	0.85	0.9	0.95	1.0
2000	1500	1200	1000	800	700
2500	1700	1500	1250	1100	950
3000	2000	1800	1600	1400	1250
3500	2350	2150	2000	1800	1600
4000	2750	2600	2400	2200	2000
4500	3150	3000	2900	2700	2500
5000	3600	3500	3400	3200	3000
5500	4100	4000	3950	3750	3600
6000	4650	4600	4500	4350	4200
6500	5250	5200	5100	5000	4850
7000	5950	5900	5800	5700	5600
7500	6650	6600	6550	6500	6400
8000	7400	7380	7350	7300	7250

二、电晕损失

当导线表面的电场强度超过空气击穿强度时，靠近导线表面的空气被击穿，就将电能转换成热、光、可听噪声和无线电干扰等形式释放，这种能量损失就是输电线路导线的电晕损失。电晕损失及其经济上的影响是多年以来的研究课题，人们收集了许多有用的试验数据和现场数据，做了大量的统计分析，以公式表示了电晕的规律，并对其有关理论方面进行了许多研究。但由于电晕损失是导线几何尺寸、导线电场强度、电压和线路所处地区气象条件的函数，十分复杂，因而至今无论对超高压线路出现的电晕损失，还是选择不同导线结构以补偿这些损失的经济方面，仍不可能做出准确的预计。

根据测试数据发现，超高压以上电压等级线路电晕损失的变动范围很大，从好天气时的每千米几千瓦至最恶劣天气时的每千米几百千瓦。年平均电晕损失比电阻损失小得多，但是恶劣天气最大的电晕损失却很大。

随着输电电压等级的提高，在选择导线截面和线路几何尺寸方面，电晕损失已经越来越不起控制作用，尤其是采用分裂导线以后，对500kV以上电压等级的线路来说，电晕产生的可听噪声和无线电干扰比电晕损失更起决定性的作用。

下面给出了估算电晕损失的方法，由于电晕损失的变化极大，即使在给定的气候条件下，计算电晕损失的准确性也不会太高，但它仍可作为选择最佳导线截面的比较计算之用。这种电晕估算方法主要基于超高压线路的实测结果来进行总结得出的，对于特高压输电线路，其电压等级及导线形式均有别于超高压线路，目前尚无较为完善的实测结果，电晕损失估算难以参考超高压线路电晕损失计算用曲线，有待于今后工程实测和总结。

（一）年平均电晕损失的估算

1. 功率损失

三相线路的年平均电晕功率损失，为三相导线在各种天气条件下（好天气、雪天、雨天、雾凇天）产生的电晕功率损失的总和，可按式（3-88）求得，即

$$P_C=\frac{n^2r^2}{8760}\left\{\left[F_1\left(\frac{E_{m1}}{\delta^{\frac{2}{3}}E_{m0}}\right)+F_1\left(\frac{E_{m2}}{\delta^{\frac{2}{3}}E_{m0}}\right)+F_1\left(\frac{E_{m3}}{\delta^{\frac{2}{3}}E_{m0}}\right)\right]t_1+\left[F_2\left(\frac{E_{m1}}{E_{m0}}\right)+F_2\left(\frac{E_{m2}}{E_{m0}}\right)+F_2\left(\frac{E_{m3}}{E_{m0}}\right)\right]t_2+\right.$$
$$\left.\left[F_3\left(\frac{E_{m1}}{E_{m0}}\right)+F_3\left(\frac{E_{m2}}{E_{m0}}\right)+F_3\left(\frac{E_{m3}}{E_{m0}}\right)\right]t_3+\left[F_4\left(\frac{E_{m1}}{E_{m0}}\right)+F_4\left(\frac{E_{m2}}{E_{m0}}\right)+F_4\left(\frac{E_{m3}}{E_{m0}}\right)\right]t_4\right\} \quad (3\text{-}88)$$

式中　P_C——三相总计的年平均功率损失，W/m；

n——子导线根数；

r——子导线半径；cm；

E_{m1}、E_{m2}、E_{m3}——分别为三相导线表面电场强度，对单导线取 E_m，对分裂导线取平均电场强度最大值，MV/m；

$F_1\left(\frac{E_{mi}}{\delta^{\frac{2}{3}}E_{m0}}\right)$——好天气电晕损失，为 $\frac{E_{mi}}{\delta^{\frac{2}{3}}E_{m0}}$ 的函数；

$F_2\left(\frac{E_{mi}}{E_{m0}}\right)$、$F_3\left(\frac{E_{mi}}{E_{m0}}\right)$、$F_4\left(\frac{E_{mi}}{E_{m0}}\right)$——分别为雪天、雨天、雾凇天的电晕损失，为 $\frac{E_{mi}}{E_{m0}}$ 的函数，计算用曲线见图3-12；

t_1、t_2、t_3、t_4——分别为一年内好天气、雪天、雨天、雾凇天的计算小时数。

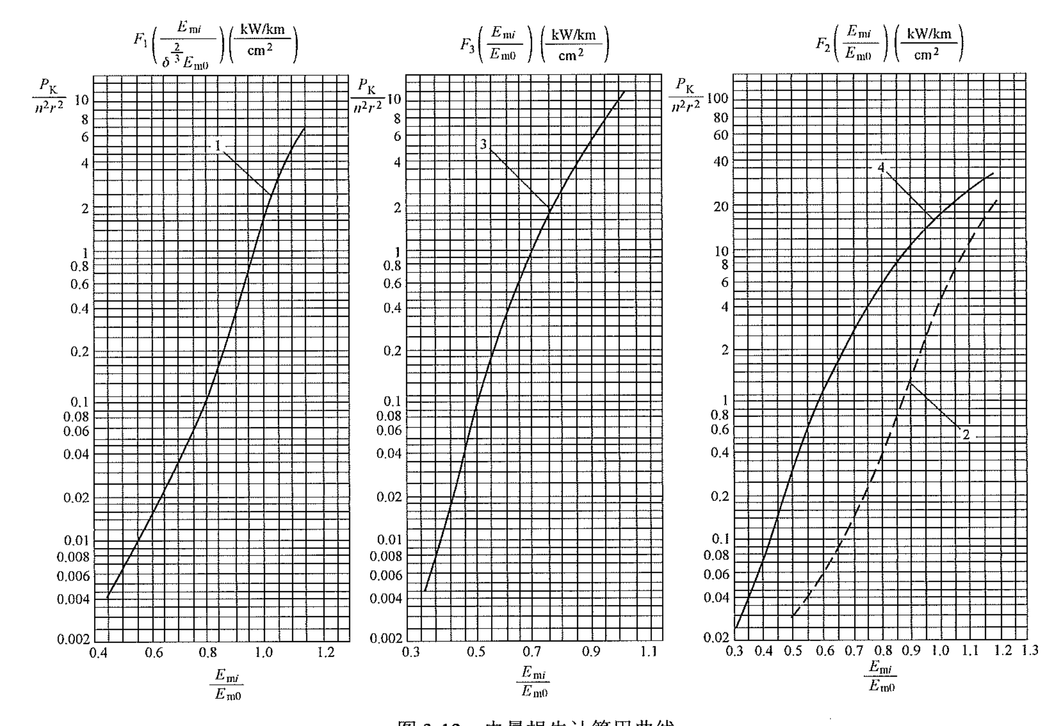


图 3-12 电晕损失计算用曲线

1—好天气；2—下雪天；3—下雨天；4—雾凇天

2. 气象资料的选择及修正

雨天除包括一般的降雨天以外，毛毛雨、雨夹雪以及湿雪天亦均属雨天。雪天系指干雪天，包括下雪花、雪球以及暴风雪等。雾凇天包括颗粒状或针状结晶的雾凇和坚实的雨凇。除上述以外均属好天气，包括雾天和阴天，还包括考虑电流使导线发热经修正后排除的一部分雨天和雾凇天在内。考虑电流发热的修正如下：

（1）雾凇天计算小时数 T_4 为实际雾凇小时数 T_4' 乘上修正系数 k_1，k_1 可从图 3-13 查得（由于目前还缺少国产导线的试验数据，所以利用了相近的国外资料）。严格地说需要进行修正的只是雾凇，不包括雨凇，但因通常缺少对雾凇天进一步划分的统计材料，所以一般就一同加以修正。图 3-13 中的 J 为平均电流密度，

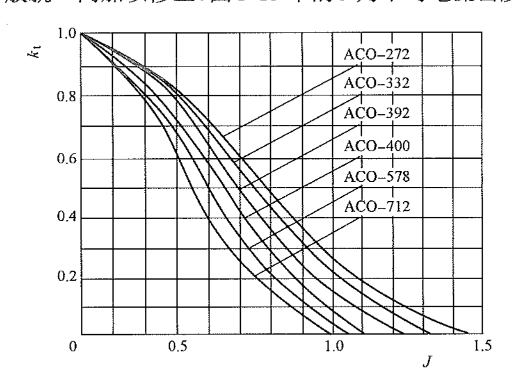


图 3-13 电流发热修正系数曲线

其单位符号为 A/mm²，一般按线路正常设计输送容量考虑。

（2）雨天计算小时数 t_3 为实际雨天小时数 t_3' 乘以修正系数 k_2。

$$k_2 = 1 - \frac{J_1}{J_{av}} \tag{3-89}$$

$$J_1 = 0.2J^2r \tag{3-90}$$

式中 J_{av}——平均降雨强度，mm/h，等于年降雨量除以降雨小时数；

J_1——临界降雨强度，mm/h。

（3）好天气计算小时数 t_1 按下式求得

$$t_1 = t_1' + (1-k_1)\times t_4' + (1-k_2)\times t_3' \tag{3-91}$$

式中 t_1'、t_4'、t_3'——分别为实际好天气、实际雾天和实际下雨天的小时数。

（4）雪天计算小时数 t_2，可由气象资料内查得，不再做修正。

（二）最大电晕损失

根据试验数据由图 3-12 曲线看出雾凇天有最大电晕损失，因此最大电晕损失 P_{cm} 按式（3-92）估计。

$$P_{cm} = n^2r^2\times\left[F_4\left(\frac{E_{m1}}{E_{m0}}\right) + F_4\left(\frac{E_{m2}}{E_{m0}}\right) + F_4\left(\frac{E_{m3}}{E_{m0}}\right)\right] \tag{3-92}$$

式中符号与式（3-88）相同。

但是需要注意到，一条长输电线路的单位长的最

大电晕损失不会达到上述值，因为沿线路的天气几乎不可能一样都是雾凇天。实际线路的最大电晕损失应按沿线天气分段计算求和确定。当利用最大电晕损失的数据来考虑附加电量时，还应考虑到与输电线最大负荷出现的同时率及其出现的概率。当出现雾凇天的概率极小时（国内一般天气情况如此），可按雨天损失作为最大电晕损失来考虑附加的电量，即 P_{cm} 为

$$P_{cm}=n^2r^2\left[F_3\left(\frac{E_{m1}}{E_{m0}}\right)+F_3\left(\frac{E_{m2}}{E_{m0}}\right)+F_3\left(\frac{E_{m3}}{E_{m0}}\right)\right] \quad (3\text{-}93)$$

式中符号与式（3-88）相同。

利用上述电晕损失的计算方法，就可以比较电晕和电阻损失的功率。电晕损失取决于气象条件，而电阻损失取决于线路负荷。根据计算看出，从 220kV 到 500kV，甚至更高电压等级，通常年平均电晕损失为电阻损失的百分之几。在我国一些升压为 220kV 运行的线路，因导线截面较小电晕严重，在导线输送按发热计算的极限负荷下，年平均电晕损失也仅为电阻损失的 25%左右。这说明为了减少电晕损失而增大导线截面是不经济的，即选择导线截面可不考虑电晕损失的影响。但最大电晕损失可达电阻损失的同一数量级，或者比电阻损失还高。随着线路电压等级的增高，送电负荷也增大，年平均电晕损失与电阻损失之比将趋于减小。

第五节 无 线 电 干 扰

产生电磁干扰的原因，是带电粒子的运动或电荷的中和过程。无线电干扰（radio interference，RI）的传播，一般有两种途径。一种是对称途径，RI 电流从干扰源流经一根导线，通过负荷及导线间的分布电容，再流经另一根导线返回干扰源。在导线之间的 RI 电压，称为对称干扰电压，即 RIV；另一种是不对称干扰途径，RI 电流同时沿几根导线传出，经地面，作用在每一根导线与地之间的 RI 电压，称为不对称干扰电压。在多数情况下，接收天线从导线上耦合到的干扰，都是由于干扰电压不对称分界作用的结果（不对称分界在干扰导线和大地之间形成的电场，作用在收信天线上）。因此，为了消除 RI 的作用，必须首先抑制不对称的 RI。

输电线路的 RI，属于不对称分量在导线和大地间形成的干扰电磁场，主要来自：导线电晕放电；因绝缘子表面污秽而产生的泄漏电流；有缺陷绝缘子的间隙击穿火花；连接金具、线夹的电晕及火花放电；间隔棒、导线接续管、补修管、防振措施，甚至均压、屏蔽环的电晕及火花；绝缘地线间隙及其小绝缘子的感应电压放电；变电站的各种干扰源通过母线传入线路上。因此，输电线路的无线电干扰，虽然主要取决于导线的电晕放电，但是实际上是上述各种干扰的总和。

输电线路的 RI，是由均匀干扰（周期性干扰）、不均匀干扰（无规律性的干扰）、脉冲干扰所构成。其干扰频谱范围在 0.1MHz～1000GHz，对任何频率的无线电接收设备均产生干扰。但主要是对调幅广播、通信（550kHz～12MHz）和电视产生干扰。5MHz 以上频率的 RI 幅值很小。

输电线路对无线电通信的干扰程度，取决于输电线路与收信设备之间的距离，接收天线的方位，接收设备的性能、制式，输电线路的各种参数，以及天气条件等。

一、输电线路无线电干扰的特性

输电线路无线电干扰的特性取决于其本身的内在因素，也还受环境、气候等影响或制约，但是仍存在一定的规律性。

（一）有关的术语

（1）输电线路的无线电干扰 RI 指在一定条件下输电线路导线表面电场强度较高时，所产生的干扰，包括导线电晕、闪络、微火花、刷状放电、绝缘子及金具等所产生的干扰。

（2）干扰电平（RI 电平）是用以衡量输电线路 RI 程度的单位，用 dB（decibel）表示，0dB 相当于 1μV/m，也称为干扰水平或干扰场强，本书均称为干扰电平。

（3）横向衰减特性，指某一频率下，随垂直于线路不同距离而使 RI 变化的规律。

（4）频率特性是线路的 RI 电平随其干扰频率变化的规律。

（5）纵向特性，指沿输电线路方向变化规律及特点。与运行状况、沿线的天气条件、弧垂大小、杆塔高低等有关，供环境保护和运行参考。

（6）无线电干扰电压（RIV），用以衡量高压电器、开关等设备零件、金具等在额定电压作用下的无线电干扰程度是测自回路中的干扰电流，流过 300Ω电阻［国际无线电干扰特别委员会（CISPR）标准为 300Ω，美国电气制造商（NEMA）标准为 150Ω］所产生的压降值，称为 RIV。输电线路的导线、绝缘子、金具及防振元件等部件必须有保证的 RIV；RIV 的 0dB 相当于 1μV。

（7）气候特性指不同气候下输电线路 RI 的变化规律。可把输电线路某种已知气候下的 RI 值，换算到另一种气候下。

（8）准峰值（QP）是一非物理量；根据 CISPR 的大量工作，发现无线电脉冲干扰引起的噪声影响，应模拟人耳生理、眼睛的视觉特性予以评价。而准峰

值符合人的眼、耳特性的要求。

准峰值仅仅与脉冲输入信号包络的最大电压值成一定正比关系，其比例系数与脉冲重复频率有关，参看图 3-14。

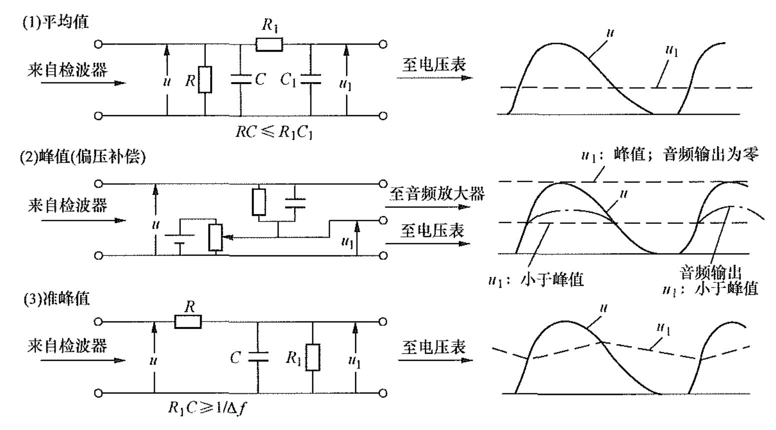


图 3-14　各种检波器加权回路

（9）干扰场强指干扰电磁场在空间的干扰强度，单位用μV/m 表示。输电线路的干扰场强，均指导线周围最大干扰场强的有效值。

（10）分贝（dB），即 decibel，1/10 贝尔（Bel），$\frac{1}{10}$ Bel＝1dB；其定义为

功率：$$N\text{（dB）}=10\lg\frac{\text{输出功率}}{\text{输入功率}} \tag{3-94}$$

RI 电平：$$N\text{（dB）}=20\lg\frac{E_1}{E_0} \tag{3-95}$$

当输出场强 $E_1=1\mu V/m$，输出功率 1μW；输入场强 $E_0=1\mu V/m$，输入功率 1μW；则式（3-94）、式（3-95）相应的 $N=10\lg\frac{1\mu W}{1\mu W}=0dB$ 及 $N=20\lg\frac{1\mu V/m}{1\mu V/m}=0dB$。在 RI 电平的表示中，规定 1μV/m 相当于 0dB。凡不加特殊说明，dB 值均为 1μV/m，相当于 0dB 的关系。

（11）背景：当输电线路停电或没发生 RI 时的环境干扰电平。背景的高低与当地的工业发展状况、地形、气候变化有关系。

（12）标准情况及标准值。交流 RI 的标准情况，是指无雨、无雾、无雪的天气，风速在 10m/s 及以下，距高压线路边线地面投影 20m 处的 RI，标准情况下，频率为 0.5MHz（或 1.0MHz）且运行时间在半年以上的 RI，称为无线电干扰的标准值（或称为基准值）。无线电干扰（RI）的测试，一般用 RI 测试仪，它的信号测试过程，如图 3-15 所示。

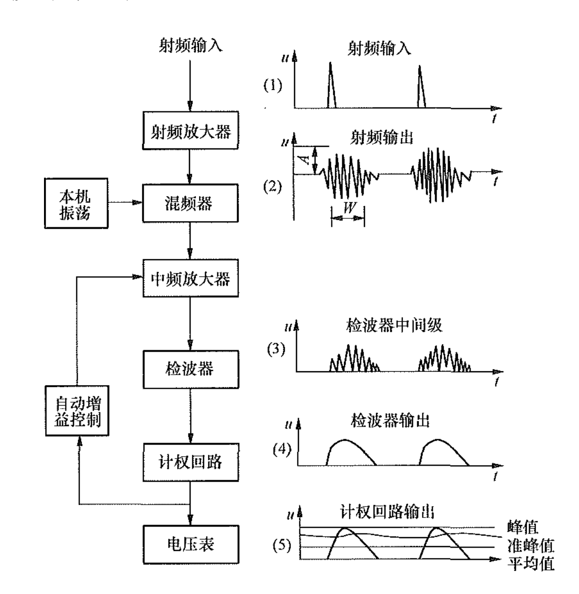


图 3-15　RI 测试仪的信号测试过程

（二）输电线路 RI 的特性

研究输电线路 RI 特性就是要掌握各种线路结构、导线型式、对地距离、地形、地物、气候对 RI 变化影响，以便预估各种状态下 RI 对环境的危害程度，合理地设计输电线路。

1. RI 的晴天特性

晴天的 RI，是输电线路的标准值，也是其他情况下 RI 计算的基础。晴天特性，是指晴天与阴天 RI 总实测数据的统计值。导线表面电场强度（有效值）的变化，仅影响 RI 的绝对值（每 1kV/cm 约变化 4dB），一般不影响其特性。晴天 RI 特性，主要取决于空气相对湿度，而相对湿度在各季节的晴天中是不相同的，因而使 RI 变化。导线表面状态，取决于导线制造工艺、老化程度，同时也随季节变化，如夏季因下雨冲洗而使导线表面的灰尘较少，导线起晕概率较低；冬天导线表面的积灰较多，因而易于造成电晕放电；风的影响（风吹导线摇摆，风吹绝缘子串、金具摇摆晃动），

使产生火花的机会增多；空气密度、海拔均对晴天 RI 有影响。

晴天的夜间，RI 随露、霜而变化，随系统电压波动而变化。从试验中得知，夜间变化均比日间的变化小。总而言之，RI 的晴天特性，是晴天昼夜、阴天昼夜等因素共同组成，其 RI 的分散性通常在±3dB 以下。输电线路晴天 RI 的取值，采用晴天、阴天全部测值的 80%～90%重复概率为基准值（CISPR 规定的重复概率为 80%）。

2. RI 的雨天特性

输电线路 RI 的雨天特性，受导线表面电场强度、降雨量及地区范围的雷电活动等影响。我国幅员辽阔，各地气候条件悬殊，因而显示出复杂关系。从各地的 RI 测量结果看，降雨对 RI 的影响如下。

（1）下雨强度与 RI 的关系。某 220kV 线路运行中测试结果如图 3-16 所示。该曲线系根据 870 个雨天测试数据绘制，下雨强度为双鸭山气象台提供，由东北电力设计院测试。由图可见，随下雨强度的增加，RI 也增加；小雨时，RI 似乎按直线增加，且较分散；降雨量超过 5mm/h 时，RI 呈饱和状曲线增加；雨量超过 7mm/h 以后，RI 虽有增加趋势，但增量极微。小雨时 RI 分散的原因，主要是由于风的强弱不同；空气中的尘埃量不同；导线表面老化层的程度不同。东北地区雨天 RI 的增加量实测最大为 10.5dB，90%为（7±2.1）dB；西南电力设计院测试的西南地区雨天 RI 的增加量实测为 10dB，80%时间、80%可靠度为 7dB。

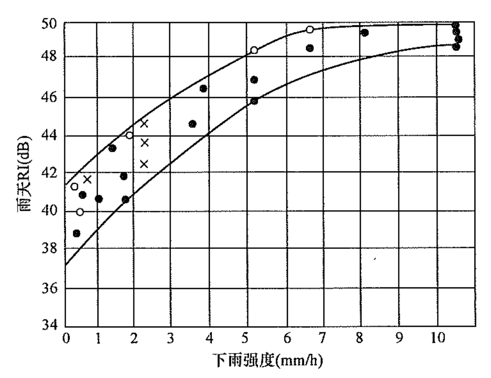


图 3-16 不同下雨强度的 RI 电平

［距边线 10m，1MHz；导线表面最大电场强度有效值 E=16.3kV/cm］

•—1981 年 8 月 80833RR$_2$ 仪的测值；

×—1981 年 8 月 60481RR$_2$ 仪的测值；

○—1981 年 8 月 KNM—402C 仪的测值

（2）导线表面电场强度与雨天 RI 的关系，如图 3-17 所示。降雨量在 1～6mm/h 范围内，RI 与导线表面电场强度的关系，大体按线性增加，即导线表面电场强度有效值每增加 1kV/cm，RI 大体增加 3.2dB；降雨量在 6～12mm/h 范围内，导线表面电场强度有效值每增加 1kV/cm，RI 大体增加 3.0dB；降雨量在 12～24mm/h 范围内，导线表面电场强度有效值每增加 1kV/cm，RI 大体增加 2.8dB。导线表面电场强度越高，雨天 RI 相对增加量越少。

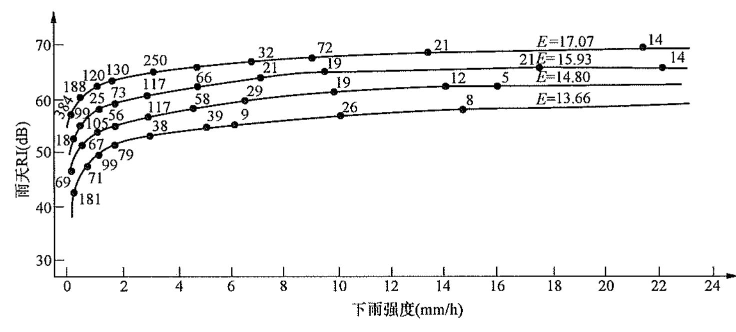


图 3-17 不同下雨强度不同导线表面电场强度的 RI 电平（4×ACSR330）（测试频率为 455kHz）

•—取样数据的平均值，数字表示取样数；E—导线表面最大电场强度有效值

3. RI 的老化特性

线路 RI 的老化特性，主要取决于导线表面氧化、炭化的程度；其次取决于绝缘子、金具、防振元件及间隔棒等的老化。

由于新导线表面有毛刺以及架线过程中导线与金具的损伤，因而在运行初期，导线易于起晕，RI 普遍偏高。根据实测，运行半年以后的 220kV 及 500kV 线路可降低 1～5dB。半年以后老化较慢；运行一年以后，老化过程基本完成。

设计时 RI 的预估值，是指运行半年后的老化值。线路刚刚投运时，在实测 RI 上应减去 1～5dB 才是线路的容许 RI。

4. RI 的雾、霜、雪天特性

雾、霜与雪虽然不同，但在导线上产生的 RI 大体相同。雾、霜、雪降量增加，RI 也随之增加，增加范围均在 0～7dB。RI 比雨天更加分散，在大雾下接近小雨时的 RI 电平。

图 3-18 及图 3-19 是降雾量、降雪量与 RI 的关系

曲线。

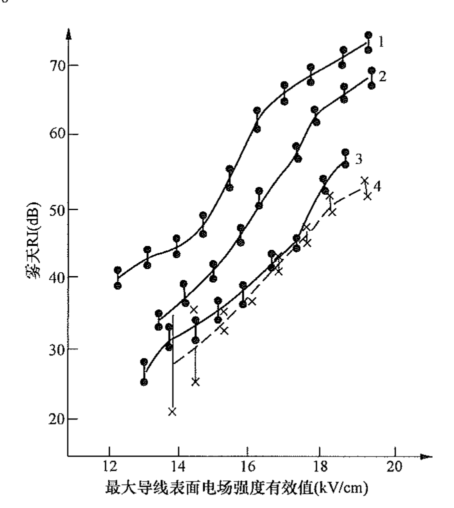


图 3-18 雾天的 RI 电平（4×ACSR330，测试频率为 455kHz）

1—1963 年 7 月 7 日 23:10～23:35（重雾）数据曲线；
2—1963 年 7 月 6 日 23:37～23:57（重雾）数据曲线；
3—1963 年 7 月 19 日 21:05～21:25（重雾）数据曲线；
4—1963 年 7 月 6 日 20:45～21:45（轻雾）数据曲线

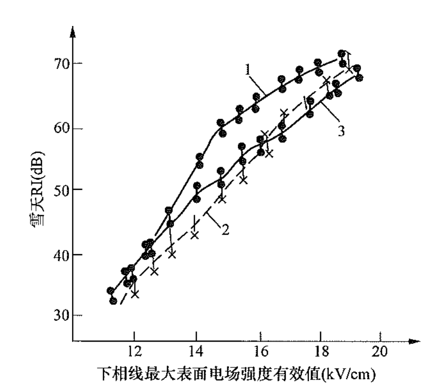


图 3-19 雪天的 RI 电平（4×ACSR330，测试频率为 455kHz）

1—1964 年 2 月 1 日（大雪）测试数据；
2、3—1963 年 12 月 18 日（中雪）测试数据

（三）RI 的测量方法与要求

输电线路及变电站 RI 的测量方法，详见 GB/T 7349—2002《高压架空送电线、变电站无线电干扰测量方法》。

（1）GB/T 7349—2002 的适用范围为 500kV 及以下的交流输电线路与变电站。测量频率为 0.15～30MHz。测量仪器必须使用符合 GB/T 6113.101～105，持有有效计量检定证书的仪表。使用准峰值检波器。使用具有电屏蔽的环状天线或柱状天线。使用记录器时，必须保证不影响测试仪的性能及测量准确度。

（2）测量要求。每次测量前，按仪器使用要求，对仪器进行校准；由于使用柱状天线测量架空输电线路的无线电干扰场的电场分量容易受到其他因素的影响，所以应优先采用环状天线。环状天线底座高度不超过地面 2m，测量时应绕其轴旋转到获得最大读数的位置，并记录方位。在使用柱状天线测量时，柱状天线应按其使用要求架设，且应避免柱状天线端部的电晕放电影响测量结果。如发生电晕放电，应移动天线位置，在不发生电晕放电的地方测量，或改用环状天线。测量人员和其他设备与天线的相对位置应不影响测量读数，尤其在采用柱状天线时。参考测量频率为 0.5×（1±10%）MHz，也可用 1MHz。为了避免在单一频率下测量时，由于线路可能出现驻波而带来的误差影响，所以应在干扰频带内对各个频率进行测量并画出相应的曲线，测量可在下列频率或其附近频率进行：0.15、0.25、0.5、1.0、1.5、3.0、6.0、10、15、30MHz。

（3）测量位置。测量地点选在地势较平坦、远离建筑物和树木，没有其他电力线和通信、广播线的地方，电磁环境场强至少比来自被测对象的无线电干扰场强低 6dB。电磁环境场强的测量，可以在线路停电时进行；或者在距线路 400m 以外进行。沿被测线路的气象条件应近似一致，在雨天测量时，只有当下雨范围为测试现场周围（或方圆）10m 以上时，测量才有效。

输电线路：测量点应在档距中央附近，距线路末端 10km 以上，若受条件限制，应不少于 2km。测量点应远离线路交叉及转角等点，但在对干扰实例进行调查时，不受此限。测量距离为距边相导线投影 20m 处。

（4）测量读数。在特定的时间、地点和气象条件下，若仪表读数是稳定的，测量读数为稳定时的仪表读数；若仪表读数是波动的，使用记录器记录或每 0.5min 读一个数，取其 10min 的平均值为测量读数。对使用不同天线的测量读数，应分别记录与处理。

在给定的气象条件下，每次的测量数据为沿输电线路近似等分布的 3 个地点的测量读数的平均值。注意，在给定的气象条件下，对某个地点、某个测量频率、一日之内不能获得多于一次的测量数据。

（5）测量次数。测量次数不得少于 15 次，最好 20 次以上。

（6）统计评价。线路及变电站 RI 均按正态分布，先算出各次测得结果 RI 的平均值 $\bar{N}$ 及标准差 S_n，进而算出干扰电平 N（$N=\bar{N}+kS_n$。其中 k 取决于测量次数 n 的常数，可以用满足 80%/80%规则来确定，具体数值为 $n=15$，$k=1.17$；$n=20$，$k=1.12$；$n=25$，$k=1.09$；$n=30$，$k=1.07$；$n=35$，$k=1.06$）。

二、输电线路无线电干扰的限值标准

输电线路无线电干扰的限值标准是环境保护的重要指标之一，同时也影响输电线路的造价。控制电力线的 RI 在标准条件下不超过容许值。通常规定线路两侧一定范围内的 RI 电平，作为设计与验收的依据。

GB 50545—2010《110kV～750kV 架空输电线路设计规范》和 GB 50665—2011《1000kV 架空输电线路设计规范》中规定了交流架空输电线路的无线电干扰限值，在距离边相导线地面投影外 20m、对地 2m 高度处，频率为 0.5MHz 时无线电干扰值应符合表 3-17 的规定。对于海拔超过规定值的线路，其无线电干扰限值应进行高海拔修正。

表 3-17 高压架空输电线路无线电干扰限值

标称电压（kV）	110	220～330	500	750	1000
海拔（m）	≤1000				≤500
限值（dB）	46	53	55	58	58

注 表中限值适用于运行时间半年以上的高压架空线路 RI。

（一）RI 限值的使用条件

（1）频率。为便于 RI 的测量，CISPR 要求各国的无线电广播及无线电通信部门，不得占用 0.5MHz 的频率，因此，我国今后的 RI 测试与计算，建议尽量采用 0.5MHz 的标准频率。

（2）气候情况。均为好天气，即无雨、无雪、无雾的天气。

（3）距离。表 3-17 的限值，是在距高压线路边导线（分裂导线为其几何中心）在地面投影 20m 处的 RI，该值为 80%的时间、具有 80%置信度的标准值。

（二）非标准距离时 RI 的计算值

如果线路 RI 值为非标准距离（不为 20m）电平，可按式（3-96）的修正，该式亦称为 RI 的距离特性。

$$N_D = N_{20} + k\lg\frac{400+(H_c-H)^2}{D^2+(H_c-H)^2} \qquad (3\text{-}96)$$

式中 H_c——导线高度，m；

N_D——距边导线投影 D 处的 RI 值，dB；

N_{20}——距边导线投影 20m 处的 RI 值，dB；

D——距边导线地面投影的水平距离，m；

H——测量仪天线的架设高度，m；

k——距离衰减系数，与频率有关，对于 0.15～0.4MHz 频段，k 取 18；对大于 0.4 直至 30MHz 频段，k 取 16.5。

通过式（3-96）既可以计算出距边导线投影不是 20m 处的 RI，也可以把距边导线投影 D 处测量的 RI 电平修正到 20m 处。不过，式（3-96）适用于距边导线投影距离小于 100m 范围内。如大于（或等于）100m，可用式（3-101）计算。

三、输电线路无线电干扰的预估

输电线路的 RI，随机因素很多，虽然可推导分析出 RI 的理论预估方法，但与实际情况往往相差较远。因而 RI 的预估，主要是下述三种方法。其一为半理论分析法，目前各国使用得较少；其二为比较法，即从已知的线路 RI，通过线路参数比较，预估出新线路的 RI；其三为激发函数法，在试验笼内的导线，从大雨状态下求得激发函数，用以预估新线路的 RI。

我国在运行线路上，对各种天气状况下测得大量 RI，将数据进行整理、分析、统计后，通过比较得到 RI 预估经验公式，用于高压和超高压线路预估。在交流特高压工程设计中也采用激发函数法预估，现介绍如下。

（一）比较法

比较法应用广泛，不但简单易行，而且对随机因素很多的输电线路方便准确。在比较法中，参与比较的因素有导线表面最大电场强度、单根导线的直径、干扰频率、导线对地面的平均高、海拔高、运行老化时间、天气、空气密度、空气温度、相对湿度、分裂导线的根数及其布置、大地导电率、运行电压、线路器材的制造水平、线路施工水平等，当然每个公式不一定包括上述全部因素。

1. 标准情况下的预估方法

输电线路 RI 电平预估的标准情况是指晴天、0.5MHz、按 CISPR 仪表参数、距边线横向水平距离为 20m 处的 RI 预估值。

根据 CISPR 及 GB/T 15707—2017《高压交流架空输电线路无线电干扰限值》的建议为

$$N_D = 3.5E + 12r - 30 + 33\lg\frac{20}{D} \qquad (3\text{-}97)$$

式中 N_D——距线路边导线 D 处（D＜100m）、0.5MHz 的 RI 电平，dB；

E——预估线路边导线表面最大电场强度有效值，kV/m；

r——单根导线半径，cm；

D——被干扰点距边导线的直接距离，m。

式（3-97）的计算值为好天气 50%的 RI，如需换算至 80%时间、80%置信度的 RI，可由该值增加 6～10dB 得到。

2. 我国早期的预估方法

在较早期，我国 RI 的实测频率多为 1MHz，在标准条件下，即晴天、1MHz、按 CISPR 仪表参数、距边线横向水平距离为 20m 处，RI 的预估公式为

$$N_{20}=41+4\times(E-15.3)\pm2.85+40\lg\frac{d}{2.72}+k\lg n \tag{3-98}$$

式中 N_{20}——距边导线横向水平距离20m处、距地面高0.5m、干扰频率为1MHz、晴天、按CISPR规定的仪器参数、鞭天线（以下均称标准条件），输电线路的RI电平预估值，dB；

41——运行线路长期实测RI值的95%概率值，其标偏为2.85dB（在80%的时间80%的重复概率为39），以下称这一项的RI值为基准值，dB；

4——导线表面电场强度有效值每增加1kV/cm时，使RI所增加的dB数陡度；

E——预估电力线的边导线表面最大电场强度有效值，kV/cm；

15.3——测量RI数据的运行线路（简称基准线路）之导线表面最大电场强度有效值，kV/cm；

d——预估线路单根导线的直径，cm；

2.72——基准线路的导线直径，cm；

k——与相导线相关的系数，取5～10；

n——相导线的分裂根数。

式（3-98）被用于110～500kV线路上，其预估RI值与实测RI值相当吻合，其值的分散性均在标偏范围内。CISPR要求采用80%的重复概率、80%时间内的RI基准值，但是考虑到我国的南方、北方、沿海、内地等实际情况，故式（3-98）采用了95%的概率基准值。

3. 非标准条件下输电线路RI修正

（1）距线路边线横向水平距离 D 处的RI电平。

$$N_D=N_{20}+\Delta N_D \tag{3-99}$$

$$\Delta N_D=20k_1\lg\frac{H_{av}^2}{H_{av}^2+(D-20)^2} \tag{3-100}$$

$$\Delta N_{D\geqslant100}=20k_1\lg\frac{H_{av}^2}{H_{av}^2+80^2}+20k_2\lg\frac{100}{D_{\geqslant100}} \tag{3-101}$$

式中 N_D——距线路边线横向水平距离 D 处（见图3-20）、晴天、1MHz的RI电平，dB。

N_{20}——标准条件下的预估算，按式（3-98），dB。

ΔN_D——RI的附加衰减值，dB，见图3-20。当 $20<D<100$ 时，按式（3-100）计算。当 $D\geqslant100$m时，按式（3-101）计算。

H_{av}——边导线对地平均高 $\left(\frac{1}{3}f+\text{导线最低点距地面高}\right)$，m。

f——导线的弧垂，m。

k_1——距离衰减系数，$20<D<100$m，k_1取2，（见表3-18）。

D——距边线的水平距离，$20<D<100$，m。

$\Delta N_{D\geqslant100}$——横向距离 D 大于或等于100m（见图3-20）RI的附加衰减值，dB。

k_1——小于100m的距离衰减系数，见表3-18。

k_2——大于或等于100m的距离衰减系数，见表3-18。

$D_{\geqslant100}$——距边线横向大于或等于100m的水平距离，m。

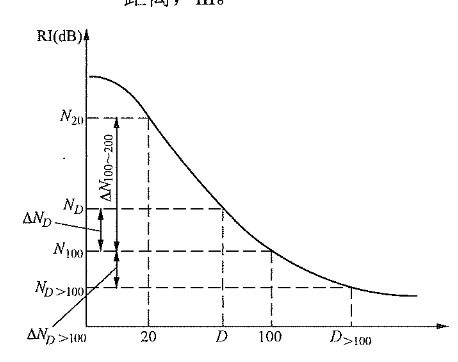


图3-20 线路干扰及其横向各种距离

表3-18 输电线路RI横向衰减系数

资料	频率范围（MHz）		衰减系数	
			k	$K=20k$
国内测试	中短波	$D<100$	2	40
		$D\geqslant100$	1	20
CISPR	0.15～0.4		1.8	36
	0.4～1.7		1.65	33
	30～100		1.2	24
	100～300		1	20

（2）频率修正。

若被干扰的对象为调幅广播、专用无线通信、导航台等，实际上所使用的频率并非标准频率1MHz。将RI值从1MHz换算到被干扰对象的接收频率 f 所引起的RI修正值 ΔN_f 为

$$\Delta N_f=20\lg\frac{1.5}{0.5+f^{1.75}} \tag{3-102}$$

式中 f——所需换算的频率，MHz。

式（3-102）的应用范围是0.15～30MHz。

当RI值从0.5MHz换算到被干扰对象的接收频率 f 时，所引起的RI修正值 ΔN_f，计算如下。

当修正频率为0.15～4.0MHz时

$$\Delta N_f = 5\times[1-2(\lg 10f)^2] \qquad (3\text{-}103)$$

当修正频率为4.0～30MHz时

$$\Delta N_f = 20\lg\frac{1.5}{0.5+f^{1.75}}-5 \qquad (3\text{-}104)$$

式中 ΔN_f ——基准干扰频率为 0.5MHz 换算到频率为f的 RI 修正值，dB；

f ——所需换算的频率，MHz。

当频率为 30MHz 及以上时，可按式（3-105）换算，即

$$\Delta N_f = 20\lg\frac{1}{f}+C \qquad (3\text{-}105)$$

式中 f ——所需换算的频率，MHz；

C ——天线形状变化常数，从试验中得（80%概率约为 20dB），dB。

举例：当频率为 0.8MHz，用式（3-103）计算出的 ΔN_f =－3dB；对于 500kV 线路 0.5MHz 的 RI 值为 55dB，所以 0.8MHz 时的 RI 限值为 $N_{20}+\Delta N_f$ = 55－3＝52dB。

（3）天气修正。

我国的大量测试统计表明，雨天 RI 较晴天增加 10dB（详见 RI 的雨天特性），测试还表明了雨天 RI 的增加量，虽然随频率的变化有所不同，即随频率的增加使雨天 RI 增加量有减少的趋势，但考虑到安全，不论频率高低，不论沿海或内地均在标准 RI 上增加 10dB 作为电力线的雨天 RI。

（4）运行电压波动而引起 RI 的修正值 ΔN_U。

可用实际运行电压计算导线表面电场强度，再用式（3-98）计算 N_{20}；也可近似采用式（3-106）算出运行下的 RI 修正值。

$$\Delta N_U = 3.8E\times\left(\frac{U-U'}{U'}\right) \qquad (3\text{-}106)$$

式中 E ——额定电压下的导线表面最大电场强度有效值，kV/cm；

U ——测量时的实际运行电压，kV；

U' ——额定电压，kV。

（5）海拔高程对 RI 影响的修正值 ΔN_H 为

$$\Delta N_H = \frac{h_2-h_1}{300} \qquad (3\text{-}107)$$

式中 ΔN_H ——海拔高程修正值，dB；

h_2 ——需换算之海拔高程，m；

h_1 ——基准线路的海拔高程，m；由于分散性，一般可取 h_1＝1000m；1000m 以下可不换算。

（6）通频带宽换算。

无线电接收设备（机）的通频带宽，通常与无线电干扰场强测试仪的通频带宽不同；或者不同型（或规格）的 RI 场强测试仪通频带宽互不相同，此时，需要把不同的通频带宽换算到同一带宽电平上，以便进行比较与计算。通频带宽的换算式为

$$\Delta N_B = 10\lg\frac{\Delta f_2}{\Delta f_1} \qquad (3\text{-}108)$$

式中 ΔN_B ——通频带宽的修正值，dB；

Δf_1 ——无线电干扰场强测试仪的通频带宽，kHz；

Δf_2 ——无线电接收设备（机）的通频带宽，kHz。

综合上述诸修正值，加在标准预估值 N_{20} 中，可得非标准条件 RI 的计算公式，即

$$N = N_{20}+\Delta N_D+\Delta N_f+\Delta N_W+\Delta N_U+\Delta N_H+\Delta N_B \qquad (3\text{-}109)$$

式中 N ——非标准条件下的输电线路 RI 电平，dB；

N_{20} ——标准条件下的 RI，见式（3-97）或（3-98），dB；

ΔN_D ——距离衰减修正值，见式（3-100）或式（3-101），dB；

ΔN_f ——频率修正值，见式(3-102)～式(3-105)，dB；

ΔN_W ——天气修正值，雨天加 10dB，雾、霜、雪加 0～10dB；

ΔN_U ——运行电压修正值，见式（3-106），dB；

ΔN_H ——海拔修正值，见式（3-107），dB；

ΔN_B ——通频带宽修正值，见式（3-108），dB。

上述各种量值均为同一种天线，或鞭天线、或框天线，不能两者混用。

（二）激发函数法

激发函数法是利用试验笼内的导线在模拟大雨状态下得到的表述电晕在导线中产生的无线电干扰电流的函数，用来预估线路的无线电干扰。该函数称为激发函数。CISPR 建议导线分裂数大于 4 的架空线用激发函数法预估线路的无线电干扰。实际上，激发函数法把导线表面电场强度、导线半径和导线数这三个影响无线电干扰的因素分开来考虑。得到的激发函数可用于一定范围内的不同导线半径、不同导线数的线路。目前特高压线路一般采用激发函数法计算无线电干扰。

激发函数法计算输电线路无线电干扰需要考虑电晕电流产生、电晕电流在输电线上传播和电晕电流对外产生辐射干扰 3 个过程。线路的无线电干扰是各相导线产生的无线电干扰的叠加。导线发生电晕会在自身及其他导线上感应出电流，电晕可等效为注入导线的无数电流源。三相输电线的电晕电流微元可用激发函数求得：

$$I=\begin{bmatrix} i_{11} & i_{12} & i_{13} \\ i_{21} & i_{22} & i_{23} \\ i_{31} & i_{32} & i_{33} \end{bmatrix}=\frac{C}{2\pi\varepsilon_0}\begin{bmatrix} \Gamma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \Gamma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \Gamma_3 \end{bmatrix}=\frac{C\Gamma}{2\pi\varepsilon_0} \tag{3-110}$$

式中 I——电晕在各相导线中产生的电流密度矩阵，其非对角元素反映了相导线间的耦合；

C——输电线电容矩阵；

Γ——激发函数矩阵；

ε_0——空气的介电常数。

一根导线上电晕电流微元的传播可用图3-21的分布式电路来等效，图中 U、I、Z、Y 分别表示电压、电流微元、单位长导线的阻抗、单位长导线的导纳。对图3-21所示分布式电路有

$$\frac{d^2 I}{dx^2}=YZI \tag{3-111}$$

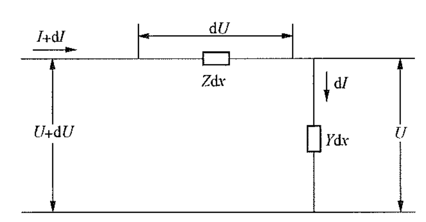


图3-21 电晕电流传播分布式电路示意图

三相输电线路中，计算一相导线电晕引起的无线电干扰时，需将式（3-111）中的 Z、Y 换成相应的矩阵 $\boldsymbol{Z}$、$\boldsymbol{Y}$，将 I 换成列向量 $\boldsymbol{I}_{ph}=[i_1,i_2,i_3]^T$。

若 λ^2 为由矩阵 $\boldsymbol{YZ}$ 的特征值生成的对角阵，$\boldsymbol{S}$ 为对应的 $\boldsymbol{YZ}$ 的特征向量矩阵，即有 $\lambda^2=\boldsymbol{S}^{-1}\boldsymbol{YZS}$，记 $i^{(m)}=\boldsymbol{S}^{-1}\boldsymbol{I}_{ph}$，对式（3-111）应用相模变换，则有

$$\frac{d^2 i^{(m)}}{dx^2}=\lambda^2 i^{(m)} \tag{3-112}$$

记 $i_0^{(m)}=\boldsymbol{S}^{-1}[i_{11},i_{21},i_{31}]^T$，结合边界条件，由式(3-112)可得

$$i^{(m)}=\frac{1}{2}e^{\lambda x}i_0^{(m)} \tag{3-113}$$

式中 λ 的对角元素实部为负值。

对式（3-113）应用相模反变换，可得到电晕电流密度 $\boldsymbol{I}_{ph}$ 的传播公式为

$$\boldsymbol{I}_{ph}=\boldsymbol{S}i^{(m)} \tag{3-114}$$

由电晕电流密度可求得该相电晕引起的无线电干扰。假设三相输电线第 j 相导线高度为 Z_j，水平坐标为 Y_j。电流微元在地面上水平坐标为 y 处产生的场强 $E_1(x,y)$为

$$\left.\begin{aligned} E_1(x,y)&=60\sum_{j=1}^{3}i_{j1}(x)F_{j1}(x) \\ F_{j1}(x)&=\frac{Z_j}{Z_j^2+(y_j-y)^2}+\frac{Z_j+2p}{(Z_j+2p)^2+(y_j-y)^2} \end{aligned}\right\} \tag{3-115}$$

$$p=\sqrt{\frac{\rho}{\pi\mu_0 f}}$$

式中 ρ——土壤电阻率，Ω；

f——频率，Hz；

μ_0——空气的磁导率，$\mu_0=4\pi\times10^{-7}$，H/m。

根据无线电干扰计算中的物理假设，由一相导线的所有电晕电流微元在水平坐标为 y 处产生的无线电干扰 $E_1(y)$可按式（3-116）积分。

$$E_1(y)=\sqrt{2\int_0^{\infty}|E_1(x,y)|^2 dx} \tag{3-116}$$

用类似方法计算其他各相电晕产生的无线电干扰，然后按国家标准合成，即可得到线路产生的总的无线电干扰。

激发函数是表征电晕产生的带电粒子及其运动特性的表达式，它是导线表面最大电场强度与导线半径的函数。导线表面最大电场强度决定电晕的强弱以及带电粒子的运动速度，导线半径决定与导体接触的空气的面积，它直接影响空气电离所产生的总电荷。

激发函数是利用试验笼内的导线或试验线路在模拟大雨状态下得到的。由于试验方法与数据处理方法的不同，所得到的激发函数会有较大区别。不同科研机构提出的激发函数如下。

美国EPRI提出的大雨状况下（所有激发函数都是表征大雨情况下的电晕）的无线电干扰的激发函数为

$$\Gamma_{EPRI}=76.62-580/E+38\lg(2r/3.8) \tag{3-117}$$

式中 E——导线表面最大场强，kV/cm；

r——导线半径，cm。

CISPR提出的用于分裂数大于4的线路的激发函数为

$$\Gamma_{CISPR}=-121+120\lg\lg(E)+40\lg\lg(2r) \tag{3-118}$$

国际大电网会议（CIGRE）提出的激发函数为

$$\Gamma_{CIGRE}=-40.69+3.5E+12r \tag{3-119}$$

加拿大魁北克电力研究所（IREQ）提出的激发函数为

$$\Gamma_{IREQ}=-93.03+92.42\lg(E)+43.02\lg(2r)+5.1-B(n) \tag{3-120}$$

式中 n——分裂导线数；

$B(n)$——修正项，$n=1$ 时，$B(n)=0$；$n=2$ 时，$B(n)=3.7$；$n \geqslant 3$ 时，$B(n)=6$。

激发函数法的计算步骤如下：

（1）计算第 k 相电晕在所有导线上感应的电晕电流；

（2）取模变换矩阵 $\boldsymbol{S}$；

（3）通过模变换，将电晕电流转换成模电流；

（4）计算传播距离 x 后的模电流；

（5）计算线路上的电晕模电流；

（6）把计算的模电流反变换成相电流；

（7）计算第 j 相导线上的电晕电流在观测点处产生的无线电干扰场强；

（8）计算第 k 相电晕在观测点处的无线电干扰；

（9）把无线电干扰场强换算为以 dB 为单位的值。

美国电气与电子工程师学会和国际大电网会议的一份联合调查报告曾将 220～765kV 运行线路在好天气下的平均无线电干扰电平，与大雨下的无线电干扰电平进行比较。根据这些线路的比较结果和特高压试验基地的有限的好天气资料，建议大雨和平均好天气之间干扰产生量的差别的平均值定为 22dB 供设计研究部门使用。

（三）同塔多回输电线路 RI 的预估

同塔双回或多回线路的 RI，如其同系统的导线皆呈对称布置，其导线表面最大电场强度有效值 E 相同，运行电压相同，可先求出其中 1 回的 N_{20} 然后合成；如果系统电压互不相同，可分别求出 N_1，N_2，N_3，…，然后合成多回综合 RI 值 N_Σ。

根据东北电力设计院在沈阳市 4 回 220kV/66kV 线路、抚顺地区双回 220kV 线路的测试结果，表明 RI 电平接近正态分布，因而有

$$N_\Sigma = 20\lg\sqrt{E_1^2 + E_2^2 + \cdots + E_n^2} \qquad (3\text{-}121)$$

式中 N_Σ——多回路的综合 RI，dB；

E_1，E_2，…，E_n——分别为同塔 1 回，2 回，…，n 回线的导线表面最大电场强度有效值，kV/cm。

当双回路运行电压相同，且导线的 E_1、E_2 相同，则式（3-121）可写成

$$N_\Sigma = 20\lg\sqrt{E_1^2 + E_2^2} = 20\lg\sqrt{E_1^2 + E_1^2} = 20\lg\sqrt{2E_1^2} = 20\lg\sqrt{2} + 20\lg E_1 = 3.01 + N_1 \qquad (3\text{-}122)$$

即双回 RI 等于其中某 1 回的 RI 值 N_1 加 3.01dB。然而这种关系仅在测点距两个相同干扰源的距离较远（100m 以上）才是正确的。如测试仪距某回线路边线在 50m 左右，计算值比实测值明显偏高，计算误差超出允许范围。在这种情况下，可按距离修正后，分别计算 N_1，N_2，…，再合成。

$$\left.\begin{aligned} N_1 &= 20\lg E_1 E_1 = 10^{\frac{N_1}{20}} \\ N_2 &= 20\lg E_2 E_2 = 10^{\frac{N_2}{20}} \end{aligned}\right\} \qquad (3\text{-}123)$$

式中 N_1、N_2——分别为同塔第 1 回和第 2 回的 RI，dB；

E_1、E_2——分别为同塔第 1 回和第 2 回的导线表面电场强度有效值，kV/cm。

将式（3-123）中的 E_1、E_2 代入式（3-122）得

$$\begin{aligned} N_\Sigma &= 20\lg\sqrt{10^{\left(\frac{N_1}{20}\right)\times 2} + 10^{\left(\frac{N_2}{20}\right)\times 2}} \\ &= 20\lg\sqrt{10^{\frac{N_1}{10}} + 10^{\frac{N_2}{10}}} \end{aligned} \qquad (3\text{-}124)$$

设 $N_1 - N_2 = \Delta N$，$N_2 = N_1 - \Delta N$，代入式（3-124）中有

$$\begin{aligned} N_\Sigma &= 20\lg\sqrt{10^{\left(\frac{N_1}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{N_1-\Delta N}{10}\right)}} \\ &= 20\lg\sqrt{10^{\left(\frac{N_1}{10}\right)}\left(1+10^{-\frac{\Delta N}{10}}\right)} \\ &= N_1 + 20\lg\sqrt{1+10^{-\frac{\Delta N}{10}}} \end{aligned} \qquad (3\text{-}125)$$

式中 N_Σ——双回路的综合 RI，dB；

N_1——同塔多回路中某一回的 RI 电平，dB；

ΔN——双回路 RI 值 N_1 与 N_2 的差值，dB。

距双回输电线路 100m 以内的 RI，试验证明用式（3-125）求其综合值 N_Σ 相当准确。多回路可同样用式（3-125）分别两两计算求得 N_Σ。为简化计算，式（3-125）可做成表 3-19 及图 3-22 的曲线。

令式（3-125）中的 $20\lg\sqrt{1+10^{-\frac{\Delta N}{10}}} = \delta N$，并代入不同的$\Delta N$ 便得表 3-19。

表 3-19　　根据双回路 RI 差值ΔN 计算其 RI 增加值δN 表

$\Delta N=N_1-N_2$（dB）	0	1	2	3	4	5	6	7
δN（dB）	3.01	2.53	2.12	1.76	1.46	1.19	0.97	0.79

$\Delta N=N_1-N_2$（dB）	8	9	10	12.5	15	17.5	20	22.5	25
δN（dB）	0.64	0.51	0.414	0.24	0.14	0.076	0.0434	0.024	0.0137

续表

$\Delta N=N_1-N_2$（dB）	27.5	30	32.5	35	37.5	40	50	60
δN（dB）	0.0077	0.00434	0.00244	0.00137	0.00077	0.00043	4.3×10^{-5}	4.3×10^{-6}

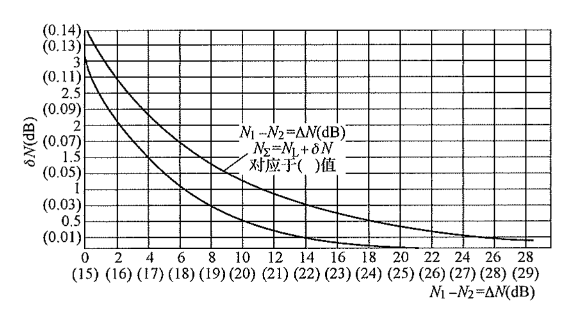


图 3-22　双回路 RI 的合成图解曲线

四、输电线路无线电干扰限值的防护及其计算

对于输电线路产生的 RI，其防护方法通常是：规定高压线的 RI 标准；从高压线自身，通过设计、施工、运行的努力进一步降低 RI；从被干扰对象上改善提高收信效益，增加抗干扰性能。

（一）信杂比（SNR）

在不同的频率下，收信天线处的信号电场强度与干扰（背景与线路 RI 的综合干扰）电场强度的比值，定义为信杂比（SNR）。其计算式为

$$SNR=20\lg\frac{E_s}{E_N}=20\lg E_s-20\lg E_N=S-N \tag{3-126}$$

式中　SNR——信杂比，dB；

E_s——无线电信号场强有效值，μV/m；

E_N——背景与电力线的合成干扰场强有效值，μV/m；

S——无线电信号电平，$S=20\lg E_s$，dB；

N——背景与电力线的合成干扰电平，$N=20\lg E_N$，dB。

不同的干扰对象，要求不同的 SNR。我国国内的大量试验表明，对于收音机或收音台站，SNR 在 20～24dB 均能保持良好的收听。对于农村居民的收音机，SNR 保持在 20dB，收听相当满意。对于重要的收音台、站，SNR 保持在 24dB 则相当清楚。对于彩色电视，SNR 保持 20～30dB 相当满意，TV 差转台、收转台的 SNR 取 35dB（6MHz 带宽），相当清楚，看不出干扰。

对于调幅广播的收听，国际大电网 CIGRE 推荐 SNR＝24dB 为良好标准，国际无线电咨询委员会 CCIR 推荐 SNR＝30dB，北美地区广播公司 NARBA 推荐 SNR＝26dB［电视差转、收转台，美国设计手册推荐 SNR＝30dB（6MHz 带宽）］。

RI 的横向衰减特性，在 100m 以上或 100m 以下有明显不同，因而应分别计算其衰减值ΔN_D。

（二）由 SNR 确定防护间距的计算

由式（3-126）可得

$$N=S-SNR=S-R_p \tag{3-127}$$

式中　N——被干扰对象的天线处的 RI 电平，用式（3-98）、式（3-109）计算，dB；

S——信号电平，用实测值，dB，当无实测值可参考表 3-20；

R_p——SNR 的简写，dB。

防护间距 D_p 可按 CISPR 推荐的公式计算，即

$$D_p=10^{\left(\frac{N_{20f}+R_p-S_p}{K}+1.3\right)}+d_d \tag{3-128}$$

式中　D_p——被干扰对象至线路中心（$20\leqslant D_p<100$m）的水平距离，m；

N_{20f}——距边线 20m 处、信号频率的线路 RI，dB；

R_p——收信设备要求的信杂比（调幅收音机农村取 20dB，城市取 24dB），dB；

S_p——接收信号电平，可按表 3-21 选取或实测，dB；

K——RI 的横向衰减系数，见表 3-18；

d_d——线路中心至边导线距离，m。

判断 100m 以内或以外，分别用式（3-100）或式（3-101）。CISPR 推荐的式（3-128）中，无 d_d 项；在近距离中如果不计此项，对特高压线路的误差较大。当 $D_p\geqslant100$m，用式（3-129）计算 D_p。

表 3-20　　我国广播、电视边界服务电平 S 的标准　　dB

序号	工作制式	地区分类		
		大城市	农村	一般情况
1	调频广播收听	60	46	
2	调幅广播收转			40
3	黑白电视收看	70	米波 54 分米波 64	

续表

序号	工作制式	地区分类		
		大城市	农村	一般情况
4	黑白电视收转	46		
5	彩色电视	在黑白电视的标准上相应增加 3dB		

表 3-21 我国调幅广播节目良好收听标准 μV/cm（dB）

序号	工作频率（MHz）	大城市①	中城市①	农村①
1	0.15（2000m）～0.3（1000m）	10000（80）	2000（66）	550（55）
2	0.546（550m）～1.5（200m）	5000（74）	1000（60）	250（48）
3	30（10m）～50（6m）	500（54）	200（46）	50（34）

① 相应栏目中括号外数字为μV/cm 数，括号内数字为 dB 数。

【例 3-1】 已知 500kV 线路导线为 4×JL/G1A-300，分裂距离为 450mm，避雷线 19 股铝包钢线，水平排列线间距离 13m，绝缘子为 28×XP-16（串长 λ=5.0m），单导线直径 2.37cm，经计算导线表面最大电场强度有效值为 E=15.9kV/cm，导线对地平均高为 20m，当地的收听频率为 1.1MHz，农村广播信号的最小值为 46dB（见表 3-20）。求 500kV 线路两侧影响农村住宅收音机收听的距离。

解 用式（3-98）进行 RI 电平预估被干扰对象 20m 处的 RI 为

$$N_{20}=41+4(E-15.3)\pm2.85+40\lg(d/2.72)+k\lg n$$
$$=41+4(15.9-15.3)+40\lg(2.37/2.72)+5\lg4\pm2.85=44\pm2.85\text{dB}$$

（以下计算将标准偏差省略）

用式（3-102）进行频率修正

$$\Delta N_f=20\lg\frac{1.5}{0.5+1.1^{1.75}}=-1\text{dB}$$

$$N_{20f}=N_{20}+\Delta N_f=44-1=43\text{dB}$$

将 N_{20f}=43dB，R_p=20dB，d_d=13m 代入式（3-128），得

$$D_p=10^{\left(\frac{N_{20f}+R_p-S_p}{K}+1.3\right)}+13=10^{\left(\frac{43+20-46}{33}+1.3\right)}+13$$
$$=78.3\text{m}$$

计算表明为保证线路两侧农民收听广播具有良好水平，该 500kV 线路选线时应尽量保持收音机距线路中心 78m 或以上。

（三）架空输电线路与调幅广播收音台的防护间距

防护间距见表 3-22。表 3-22 的使用说明及术语含义如下：

（1）防护间距是指输电线路靠近调幅广播收音台一侧边导线到调幅广播收音台天线的距离，110kV 及以下架空输电线路还应包括到机房天线馈线入口处的距离。

表 3-22 架空输电线路与调幅广播收音台、监测台的防护间距 m

序号	接收台等级		架空输电线路电压等级（kV）				
			35	66～110	220～330	500	750～1000
1	收音台	一级台	600	800	1000	1200	1800
2		二级台	300	500	700	900	1000
3		三级台	100	300	400	500	700
4	监测台	一级台	1000	1400	1600	2000	2400
5		二级台	600	600	800	1000	1250
6		三级台	100	300	400	500	750

注 500kV 及以下电压等级数据摘自 GB 7495—1987《架空电力线路与调幅广播收音台的防护间距》，750～1000kV 数据来自 750kV 及特高压工程相关研究结论。

（2）调幅广播收音台，是指接收调幅信号，并将信号传送至当地转播发射台或有线广播网作信号源使用的专用调幅广播收音台。根据行政隶属和业务性质共分三级。

一级调幅广播收音台：为广播电影电视部[1]设在北京以外的转播发射台收转中央人民广播电台或中国国际广播电台节目的调幅广播收音台以及为省、自治区、直辖市直属转播发射台收转中央人民广播电台节目的调幅广播收音台。

二级调幅广播收音台：为省、自治区、直辖市直属转播发射台收转省、自治区人民广播电台节目的调幅广播收音台；为地区、省辖市直属转播发射台收转中央人民广播电台节目的调幅广播收音台。

三级调幅广播收音台：为市、县级转播发射台收转中央人民广播电台和省、自治区、直辖市人民广播电台节目的调幅广播收音台，以及县级有线广播网的调幅广播收音台。

（3）监测台（站），是对广播播出质量和广播所需的各种技术数据、资料等进行监听、监测和分析的专用调幅广播收音台。监测台（站）根据监测范围、监测项目、监测精度、工作时间以及技术设备的不同要求，共分三级。

一级监测台：广播电影电视部所属监测、监听国内外广播质量、技术参数、广播频谱负荷和测定广播电台方位，并进行有关电波传播研究等工作的监测台。

二级监测台（站）：广播电视部、省、自治区、直辖市所属监测、监听部分广播质量、技术参数和测定广播电台方位等工作的监测台（站）。

三级监测台（站）：为省、自治区、直辖市、地区、省辖市监测、监听区域性广播质量、技术参数等工作的监测台（站）。

（4）表 3-22 中，非标准电压等级 66kV 线路，按 110kV 电压的防护间距标准；330kV 线路按 220kV 电压的防护间距标准。

（5）35kV 以下架空配电线路与一级调幅广播收音台、一级监测台、二级监测台（站）的防护间距按表 3-22 中 35kV 线路的规定标准；与二、三级调幅广播收音台、三级监测台（站）的防护间距参照表 3-22 中 35kV 线路的规定标准。满足上述规定有困难时，可协商解决。

[1] 2018 年 3 月，根据国务院机构改革方案设立国家广播电视总局；负责广播电视、网络视听节目服务管理。——编注

（6）GB 7495—1987 第 3.4 条明确规定：当满足表 3-22 的防护间距确有困难时，可通过计算，进一步缩小防护间距。

（四）输电线路与收音台防护间距的计算

短波或间距大于 100m，用式（3-128）计算便发生了困难。此外，当间距不能满足表 3-20～表 3-22 的要求时，也需要做进一步的计算，在保证其接收质量的前提下，尽可能地缩小两者间距。

当间距超过 100m，设两者的间距为 D_p，则

$$D_p = 10^{\left[\frac{N_{20f}+R_p-(S_p+0.699k_1)}{20k_2}+2\right]} + d_d \quad (3\text{-}129)$$

式中　D_p——输电线路中心线与收信台间等于或大于 100m 以上的间距，m；

N_{20f}——线路横向 20m 处广播信号频率为 f 的晴天 RI 电平，dB；

R_p——收信台要求的 SNR，dB；

S_p——接收信号电平（按实际值，如无实际值采用表 3-20），dB；

k_1——间距小于 100mRI 的横向衰减指数，见表 3-18，通常取 $k_1=2$；

k_2——间距大于 100mRI 的横向衰减指数，见表 3-18，通常取 $k_2=1$；

d_d——线路中心线至边线距离，m。

式（3-129）中的 N_{20f} 应考虑各种修正。同时式（3-128）及式（3-129）仅适用于低背景，当背景电平较高时，则在计算中将出现虚假现象。

（五）用允许背景增量确定干扰间距

不论式（3-128）或式（3-129），均以保持 SNR 一定的条件确定两者的防护间距 D_p。但是，若收音信号较弱（通常达不到表 3-20 及表 3-21 的规定），同时背景较高，其 SNR 本来就未满足要求。这样，即使线路与收音台间距为无穷大（即 RI=0），也无法达到其信杂比的要求值，于是用式（3-128）、式（3-129）计算防护间距就发生了困难。

此外，由于种种原因，收信设备往往不能提供准确的参数，例如 S_p、R_p 及收信设备的性能等，于是用式（3-128）、式（3-129）也有困难。

在这种情况下，可根据 GB 7495—1987《架空电力线路与调幅广播收音台的防护间距》，所推荐的计算方法，按背景确定间距，用控制背景的增加量来确定两者间距。只要双方商定背景的允许增加量，通过实测背景便可算出两者的间距，见式（3-130）。

$$D_p = 10^{\left[\frac{N_{20f} - N_b - 10\lg(10^{0.1\Delta N} - 1)}{20} + 0.6\right]} + d_d \tag{3-130}$$

式中 D_p——线路中心线与收音台的防护间距，m；

N_{20f}——线路在 20m 处、广播信号频率 f 的 RI 电平，dB；

N_b——在线路横向 D_p 点的背景电平，dB；

ΔN——D_p 点背景的允许增加值，取值见表 3-23，dB；

d_d——线路中心至边线距离，m。

如果导线的平均高度已知时，可用式（3-131）进一步计算最小间距 D_p，即

$$D_p = \frac{(10H_{av})^2}{H_{av}^2 + 80^2}\sqrt{\frac{10^{0.1(N_{20f} - N_b)}}{10^{0.1\Delta N} - 1}} + d_d \tag{3-131}$$

式中 H_{av}——导线对地的平均高度，m；

其余符号见式（3-130）。

当已知边导线正下方的 RI（CISPR，径向电场），两者间距可按式（3-132）计算。

$$D_p = \frac{(10H_{av}^2)^2}{(H_{av}^2 + 20^2)(H_{av}^2 + 80^2)} \times \left[\frac{10^{0.1(N_{0f} - N_b)}}{10^{0.1\Delta N} - 1}\right]^{\frac{1}{2}} + d_d \tag{3-132}$$

式中 N_{0f}——导线正下方、广播信号频率 f 的 RI 电平，dB；

其他符号含义同式（3-131）。

式（3-131）与式（3-132）基本相同。只是将 N_{20f}（20m 处的 RI）变换成 N_{0f} $\left(N_{0f} = N_{20f} + 20\lg\frac{H_{av}^2 + 20^2}{H_{av}^2}\right)$，这样符合 CISPR 的径向电场关系，两式的计算结果基本一致，举例如下。

【例 3-2】 某 500kV 线路，其参数 H_{av}=16m，d_d=13m，N_{20f}=50dB，SNR 及 S_p 均无法提供，双方协商同意背景增加量 ΔN=0.4dB，实测背景电平（均为 1MHz）N_b=16dB。求两者间的防护距离。

解 由式（3-131）求得两者间的防护距离为

$$D_p = \frac{(10H_{av})^2}{H_{av}^2 + 80^2}\sqrt{\frac{10^{0.1(N_{20f} - N_b)}}{10^{0.1\Delta N} - 1}} + d_d$$

$$= \frac{(10\times16)^2}{16^2 + 80^2}\sqrt{\frac{10^{0.1(50-16)}}{10^{0.1\times0.4} - 1}} + 13 = 634\ (\text{m})$$

当用式（3-132）计算时

$$N_{0f} = N_{20f} + 20\lg\frac{H_{av}^2 + 20^2}{H_{av}^2}$$

$$= 50 + 20\lg\frac{16^2 + 20^2}{16^2} = 58.17\ (\text{dB})$$

于是可得出两者间的防护距离为

$$D_p = \frac{(10H_{av}^2)^2}{(H_{av}^2 + 20^2)(H_{av}^2 + 80^2)} \times \left[\frac{10^{0.1(N_{0f} - N_b)}}{10^{0.1\Delta N} - 1}\right]^{\frac{1}{2}} + d_d$$

$$= \frac{100\times16^4}{6656\times656} \times \left[\frac{10^{0.1(58.17-16)}}{10^{0.1\times0.4} - 1}\right]^{\frac{1}{2}} + 13 = 633\ (\text{m})$$

由以上计算可看出两种计算结果基本相同。用式（3-130）～式（3-132）计算后，由于均满足防护要求，故可取其最小值。

背景电平增加量 ΔN 建议值，见表 3-23。

表 3-23 背景电平增加量建议值 dB

序号	收信或监测台等级	背景增量建议值 ΔN
1	一级	0.4
2	二级	1
3	三级	1.5

注 摘自 GB 7495—1987《架空电力线路与调幅广播收音台的防护间距》。

（六）输电线路对航空无线电导航台站的干扰与防护

根据 GB 6364—2013《航空无线电导航台（站）电磁环境要求》，输电线路对航空无线电导航台站的干扰对象主要有：无方向信标台，超短波定向台，仪表着陆系统，全向信标台，测距台，塔康导航台，着陆雷达站。各机场的无线电导航设备不尽相同，选线及协议时根据不同的无线电导航设备，选择不同的防护距离。

1. 无方向信标台

无方向信标台的工作频率在 0.15～0.7MHz 范围内；覆盖区最低信号场强，在北纬 30° 以北为 70μV/m（−109dBW/m²），在北纬 30° 以南为 120μV/m（−104dBW/m²）；在覆盖区域内，要求工业（含科学和医疗设备，下同）干扰的 SNR 为 9dB，其他有源干扰的 SNR 为 15dB。

以无方向信标天线为中心，半径 500m 以内不得有 110kV 及以上输电线路；150m 以内不得有 110kV 以下架空输电线路。100m 范围内，地势应平坦、开阔。

2. 超短波定向台

超短波定向台的工作频率在 118～150MHz 和 225～400MHz 两个频段中；最低定向信号场强为 90μV/m（－107dBW/m²）；要求的 *SNR*：工业为 14dB，其他有源干扰为 20dB。

以定向天线为中心，半径 700m 以内不应有 110kV 及以上的输电线路；500m 以内不应有 35kV 及以上的输电线路；300m 以内不应有金属线缆；70m 以内不应有建筑物（机房除外）；70m 以外建筑物的高度不应超过以天线处地面为准的 2.5° 垂直张角。

3. 航向信标台

航向信标台的工作频率在 108.1～111.975MHz 范围内；航向信标台的覆盖区如图 3-23 所示；在覆盖区内，要求工业的 *SNR* 为 14dB，其他有源干扰的 *SNR* 为 20dB。

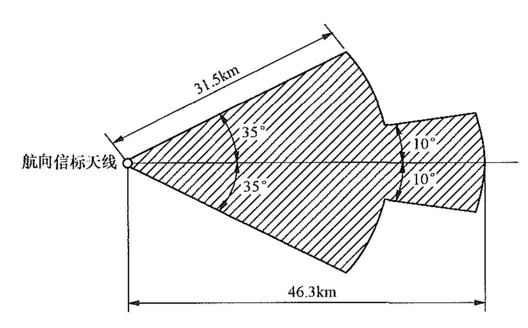


图 3-23　航向信标台信号水平覆盖区

在航向信标台场地保护区内（见图 3-24），不得有架空金属线缆；进入航向信标台的电源线应从保护区外埋入地下；在信标台天线前向 ±10°、距天线阵 3000m 的区域内，不应有高于 15m 的建筑物、输电线路等大型反射物体存在。

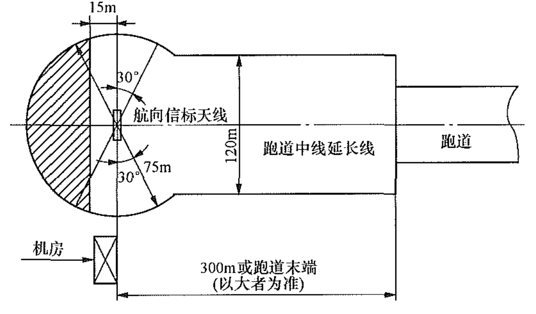


图 3-24　航向信标台场地保护区

4. 下滑信标台

下滑信标台的工作频率在 328.6～335.4MHz 范围；覆盖区如图 3-25 所示，在覆盖区内最低信号场强为 400μV/m（－95dBW/m²）；覆盖区内对工业要求的 *SNR* 为 14dB、对其他有源干扰为 20dB。

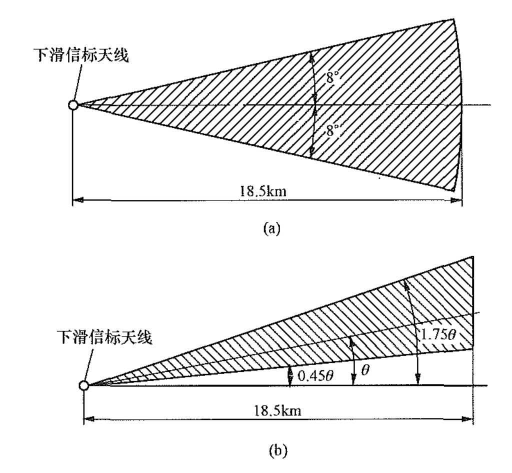


图 3-25　下滑信标台信号覆盖区

（a）水平覆盖；（b）垂直覆盖

下滑信标台的保护区如图 3-26 所示。在 A 区不得有金属栅栏和架空金属线缆；进入的电源线应从 A 区外埋入地下；在 B 区内不应有输电线路等大型反射体存在；C 区不应有架空输电线路。

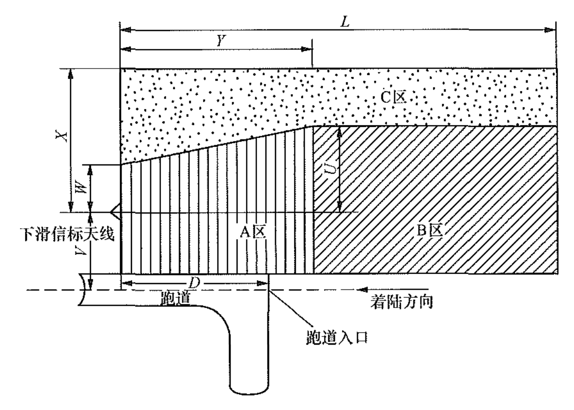


图 3-26　下滑信标台场地保护区

D—下滑信标天线至跑道着陆端的距离，m；*U*—60m；
V—下滑信标天线至跑道中线的距离，m；*W*—30m；
X—120m；*Y*—360m 或距离 *D*（以大者为准）；
L—通常为 900m，不应小于 600m

5. 指点信标台

指点信标台工作频率为 75MHz，覆盖区如图 3-27 所示，要求 *SNR* 为 23dB。

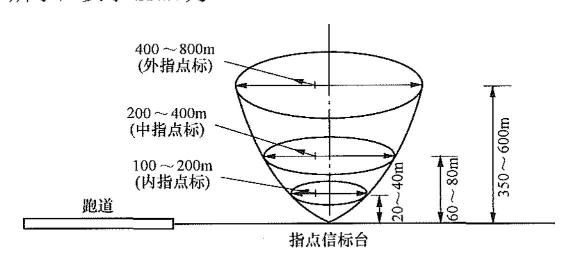


图 3-27　指点信标台信号覆盖区域

在保护区内（见图 3-28），不得有超出以地网或天线阵最低单元为基准、垂直张角为 20° 的障碍物。

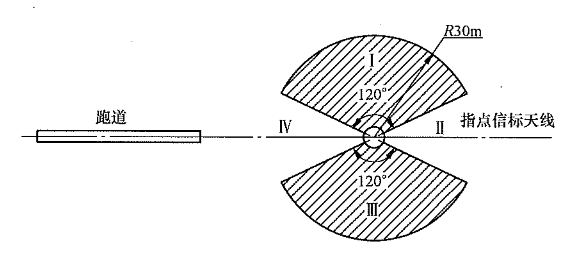


图 3-28　指点信标台保护区

6. 方位台

方位台的工作频率在 5031.0～5090.7MHz 范围；在方位台信号覆盖区内，对各种有源干扰的防护率为 17dB。方位台的场地保护区见图 3-29，在方位台场地保护区内不应有架空输电线路。进入方位台的电力线和通信线缆应从保护区外埋入地下。

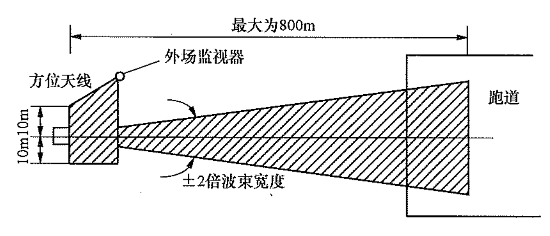


图 3-29　方位台场地保护区

7. 全向信标台

全向信标台的工作频率在 108～117.975MHz 范围；飞行高度为 400m 时，覆盖区半径为 65km；覆盖区内的最低信号场强为 90μV/m（39dB）；要求的 *SNR*，对工业为 14dB，对其他有源干扰为 20dB。

以天线为中心，半径 500m 以内，不应有超出基准面高度的 110kV 及以上的架空输电线路；以多普勒全向信标天线基础中心为基准点，以多普勒全向信标天线反射网平面为基准面，半径 200m 以内不应有超出基准面高度的 35kV 及以上的架空输电线路，半径 500m 以内不应有超出基准面高度的 110kV 及以上的架空输电线路。

8. 测距仪台

测距台的工作频率在 962～1213MHz 范围；飞行高度为 400m 时，覆盖半径为 65km；其覆盖区内的最低信号场强为 689μV/m（$-89dBW/m^2$）；在覆盖区域内，对各种有源干扰的 *SNR* 为 8dB。

测距台的场地保护要求，半径 500m 以内不应有超出基准面高度的 110kV 及以上的架空输电线路。

9. 塔康导航台（TACAN）

塔康导航台的工作频率在 962～1213MHz 范围；飞行高度为 400m 时，覆盖区半径为 65km；覆盖区内最低信号场强为 1000μV/m（$-86dBW/m^2$）。对各种干扰源的 *SNR* 为 8dB。

以天线为中心，半径 300m 以内不得有架空金属电缆。引入塔康导航台的电源线应从 300m 以外埋入地下，300m 以外的障碍物，其高度应满足如下要求（见图 3-30）：

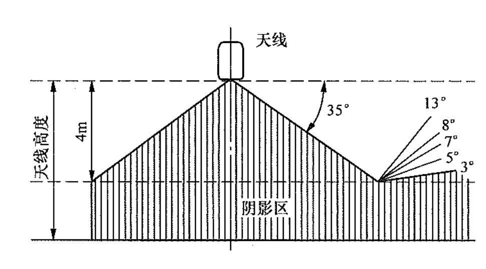


图 3-30　塔康导航台场地要求

（1）最大水平张角为 9° 的区域，允许最大垂直张角为 13°；

（2）最大水平张角为 30° 的区域，允许最大垂直张角为 7°；

（3）最大水平张角为 3° 的障碍物，允许最大垂直张角为 8°；

（4）最大水平张角为 10° 的障碍物，允许最大垂直张角为 5°。

10. 精密进场雷达站

精密进场雷达站的工作频率为（9370±30）MHz；其覆盖区如图 3-31 所示；距天线 500m 以内不应有高于以天线为基准 0.5° 垂直张角的障碍物。当雷达站配有超短波定向台时，还应满足超短波定向台的有关要求。

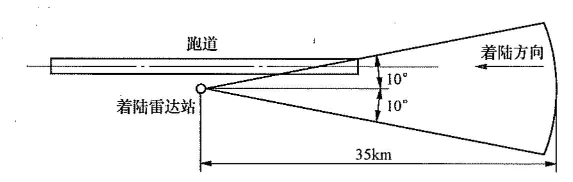


图 3-31　精密进场雷达站信号覆盖区

11. 对航空导航台 RI 距离的计算

输电线路路径满足上述对航空导航台站的保护间距有困难时，可以通过计算协商解决。根据输电线路的 RI，覆盖区内的最小信号电平及所要求的 *SNR*，按式（3-133）计算防护间距。

$$d=30\times10^{\left(\frac{E_{30}-E_s+R}{20A}\right)} \tag{3-133}$$

式中　d——防护间距，m；

E_{30}——距工业、科学和医疗设备 30m 处的干扰允许值，实测值或采用表 3-24 中的数值，

dB；

E_s——航空设备的最小信号场强，dB；

R——防护率，dB；

A——工业设备干扰的衰减指数，参见表 3-24。

表 3-24 工业、科学和医疗设备干扰允许值及其衰减特性

防护对象	频率范围（MHz）	防护率（dB）	工、科、医设备干扰衰减指数	离开工业、科学、医疗设备用户 30m 处的 RI 允许值 dB（μV/m）
无方向信标台	0.15～0.535	9	$d^{-2.8}$	85
超短波定向台 航向信标台 全向信标台 下滑信标台	108～400	14	d^{-1}	40

12. 导航台站覆盖区和进场着陆时的飞机飞行高度

运输机按远、近距导航台进场着陆时的下滑线如图 3-32 所示。

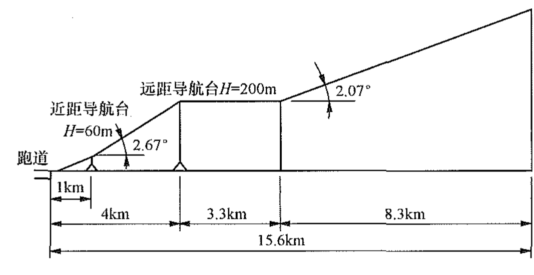


图 3-32 客货飞机下滑线

利用航向信标台、下滑信标台、全向信标台、测距台和塔康导航台，引导飞机进场着陆时的最低飞行高度，按最低下滑角为 2.5° 计算。

除进场着陆阶段外，飞机在无方向信标台、全向信标台、测距台和塔康导航台覆盖区内的最低飞行高度为 400m，在仪表着陆系统航向信标台和下滑信标台覆盖区内的最低飞行高度为 600m。

（七）输电线路对电视差转台、转播台干扰的保护标准

1. 国家的干扰保护标准

根据架空高压线路、变电所对电视差转台、转播台干扰防护标准的要求，为使架空线路与电视差转台、转播台的建设安全可靠、经济合理、正常运行，必须按照表 3-25 控制两者间距。

（1）不同电压等级之架空输电线路与各频段电视差转台、转播台间的防护间距，应不小于表 3-25 的规定。

表 3-25 架空线路对电视差转台、转播台 RI 的防护间距 m

频段	额定电压（kV）				频率范围（MHz）
	110	220～330	500	750～1000	
VHF（Ⅰ）	300	400	500	750	48.5～92
VHF（Ⅲ）	150	250	350	750	167～223

（2）表 3-25 国家标准的使用条件是，只保护广播电视部电视网规划内的电视差转台、转播台，凡不属广电部电视网内的其他电视收转台（如机关、单位、居民的集中天线或微波天线等），均不受本国标保护。

接收电视信号后的差转频率，有时需根据地区的规划，以及背景的变化情况而改变，因此，GBJ 143—1990《架空电力线路、变电所对电视差转台、转播台无线电干扰防护间距标准》只分两段保护，VHF（Ⅰ）及 VHF（Ⅲ），分别称为甚高频一段及甚高频三段。VHF（Ⅰ）的频率为 48.5～92MHz；VHF（Ⅲ）的频率为 167～223MHz。

2. 防护间距的计算

表 3-25 中规定的间距均考虑了一定的裕度。某些特殊情况，如升压线路，或地形特殊，或大跨越，当不能满足表 3-25 所要求的防护间距时，可通过计算方法进一步缩小防护间距，协商解决。

高压架空线路与 TV 差（收）转台防护间距的计算通式为

$$D=\left[\frac{f_0^{\alpha}d_0^{k}}{f^{\alpha}}\times\left(10\exp\frac{N_{d0f0}+R-S_{df}+A}{20}\right)\right]^{1/K} \tag{3-134}$$

式中 D——架空线路边线（变电站为围墙或栅栏）与 TV 差（收）转台接收天线之间的防护间距，m；

f_0——VHF RI 的基准测量频率，建议采用 100 或 75，MHz；

d_0——测量 VHF RI 的基准距离（建议采用 20m），m；

f——TV 差（收）转台的接收信号频率，MHz；

α——VHF RI 的频率衰减系数，$\alpha=1\sim1.03$；

k——VHF RI 的距离衰减系数，$k=1.0025\pm0.014$；

N_{d0f0}——距架空线路边线 d_0 处、频率为 f_0 的 VHF RI 电平（见表 3-26），dB；

R——TV 差（收）转台合理的信杂比，根据台的重要性及地形特点，取 30～40dB；

S_{df}——TV 差（收）转台天线 d 处、频率为 f 的接收信号电平，通常可实测，如无实测

值，见表 3-20，dB；

A——多干扰源的 RI 分配系数，例如，双回路 $A\leqslant 3$；单回路 $A=0$，准确计算用式（3-124）及表 3-26 之基准值，通过距离衰减后计算，dB。

表 3-26 架空高压线路 VHF RI 的 N_{d0f0} 实测统计值 dB

频段	额定电压（kV）		
	110	220～330	500
VHF（Ⅰ）	27	30	31.8
VHF（Ⅲ）	18	21	23

高压线路与 TV 差（收）转台间防护间距的简化计算式，根据试验结果，$\alpha=1$，$k=1$，$d_0=20$m，$f_0=100$MHz，代入式（3-134）中得

$$D=\frac{2000}{f}\times 10\exp\left(\frac{N_{20.100}+R-S_{df}}{20}\right) \tag{3-135}$$

式中 $N_{20.100}$——距高压线路边线（变电站围墙）20m 处、频率为 100MHz 的 VHF RI 值，dB；单回路 $A=0$，其余符号含义同式（3-134）。

我国目前对 $N_{20.100}$ 未有具体规定。根据现场的大量实测表明，白天用 100MHz 实测 VHF RI 比较安静，可获得较准确的线路甚高频干扰值；某些地区如果 100MHz 被调频广播占用时，亦可采用 75MHz，此时式（3-135）中的第一项 $2000/f$，应改为 $1500/f$。

GBJ 143—1990 中的 N_{d0f0}（见表 3-26），是 VHF（Ⅰ）及 VHF（Ⅲ）偏大的统计值（为了安全）。

当线路的无线电干扰频率与 TV 的接收信号频率相同时，式（3-135）（将 $f=100$ 代入）可进一步简化为

$$D=20\times 2\exp\left(\frac{N_{20}+R-S+A}{B}\right) \tag{3-136}$$

式中 D——高压线路边线至 TV 差（收）转台接收天线间距，m；

N_{20}——距高压线路 20m 处、与 TV 台接收频率相同的干扰值，dB；

R——TV 差（收）转台的信杂比，通常取 30dB（县）～40dB（省、市）；

B——每倍程距离 VHF RI 的衰减量，可按 6dB 计算；

A——RI 分配系数，单回路 $A=0$，多回路计算见式（3-124）、式（3-125）。

式（3-136）是 GBJ 143—1990《架空电力线路、变电所对电视差转台、转播台无线电干扰防护间距标准》所采用的公式。由于此式中 N_{20} 与 S 的频率相同，因而现场实测 N_{20} 或测量 S 时，会彼此影响，测不出准确的信号或干扰电平。

交流输电线路应满足与无线台站的防护距离要求，详见第十三章第一节电磁环境保护。

第六节 可 听 噪 声

在较低的运行电压下，因噪声级很低，不会引起人们的关注。但随着线路电压等级的不断提高，特别是特高压线路的出现，可听噪声已经成为线路的限制因素。

交流输电线路的可听噪声主要发生在坏天气下。在干燥条件下，导线电场强度通常是在电晕起始水平以下运行，只有很少的电晕源。然而，在潮湿条件下，因为水滴碰撞或聚集在导线上而产生大量的电晕放电，每次放电都发生爆裂声。

本节主要讨论架空输电线路可听噪声的计量、预估方法和我国关于可听噪声的限值标准。叙述对噪声的评价问题，影响噪声的一些因素等，以供线路设计时参考。

一、输电线路可听噪声及其计量

输电线路可听噪声有两个特征分量：宽频带噪声（也称无规噪声或电晕噪声，可用油煎声、噼啪声、嘘嘶声来描述）。频率为两倍工频（100Hz 或 120Hz）及其整数倍频率的纯分量（交流声）。宽频带噪声是由导线表面在空气中的局部放电（电晕）产生的杂乱无章的脉冲所造成的。在交流电压所产生的电晕模式中，最重要的可听噪声源是极性流注。这些流注束发生在每一周的正极性上，因此在频谱中有可能出现工频和更高的谐波分量。它们的振幅通常不大，并且对电晕噪声的烦恼程度的作用可以忽略不计。交流声是导线周围的空间电荷的运动造成的；由于正离子和负离子离开和到达导体表面的运动，在每半周内使空气压力变换方向两次。空间电荷由空气的电离而产生，一个局部放电既能造成电晕噪声又产生交流声。在不同的天气条件下，电晕噪声和交流声的相对数值是不同的。如与雨天发生的情况相反，在结冰条件下会产生很高的交流声，而电晕噪声级却较低。

声压级指研究可听噪声时所测得的量，为声压的有效值。声压级通常是以 0.00002Pa（1Pa=10μbar）作为基准声压。0.00002Pa 系正常人在 1000Hz 时所能听到的最低声压。人所能听到的声音的声压级范围是 1～1000000 基准声压。声压级以分贝（dB）表示，以分贝表示的声压级为被测声功率与基准声功率之比以 10 为底的对数值的 10 倍。因为声功率与声压的二次

方成正比，故

$$以分贝表示的声压级 = 10\lg\left(\frac{P^2}{P_0^2}\right) = 20\lg\left(\frac{P}{P_0}\right)$$

式中 P——被测声压，Pa；

P_0——基准声压，为 0.00002Pa。

用声级计可以检测全部的声压级。然而，人对声的感觉与频率关系很大，因此这种测量的意义不大。对各种不同声压分量进行加权后可得到更为有用的测量值。因此，声级计配有一套称为 A、B 和 C 的频率计权网络，再加上一个"平坦"响应网络。使用的最普遍的是计权网络 A，用它来测得的声压级通常以 dB（A）表示。这种网络是模拟人耳对纯音的平均响应，而且在频率低于 1000Hz 时，对频率有非常明显的依赖性。尽管人对噪声的反应十分复杂，以致不能用单一数字表示，但仍广泛使用 dB（A）。我国国家噪声标准规定的声级也采用 dB（A）。

声音在空气中的衰减取决于相对湿度和频率。由图 3-33 看出，在相对湿度值较低（5%～20%）的临界相对湿度时，衰减达到最大值；当湿度高于临界值时，衰减随着湿度的增加而减小。图 3-34 表示出了在不同湿度下衰减与频率的关系。图 3-34 表明，低频声音实际是不衰减的。在频率为 1000Hz 以上时，发生明显的衰减。

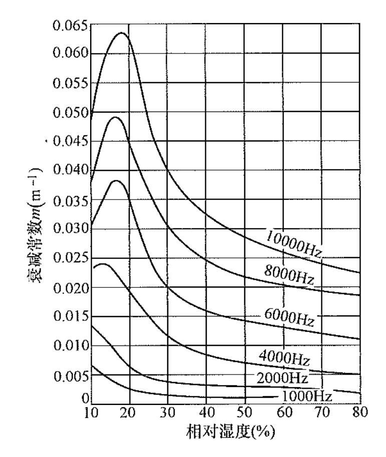


图 3-33 对不同频率声能衰减常数 m 的实验值与相对湿度的关系（温度假定 20℃）

为了实际计算坏天气下离导线 100m 及以内的短距离处的噪声、声音在空气中的衰减和测量仪器方向特性的综合影响，可采用 dB（A）值每 30m 衰减 1dB（A）。100Hz 交流声无需考虑衰减问题。

噪声的叠加视其性质是有规和无规而遵循着不同的规律。电晕噪声叠加的方法是其功率密度线性相加，因而声压级等于每个个别噪声声压级的二次方和的二次方根。纯音（如交流声）叠加的方法则与它们的相位有关。如果两个交流声同相，则声压级相加；如果它们反相，则合成声级为两者之差。因此，来自输电线路三个相的噪声，对于电晕噪声和交流声以完全不同的方式组合起来。

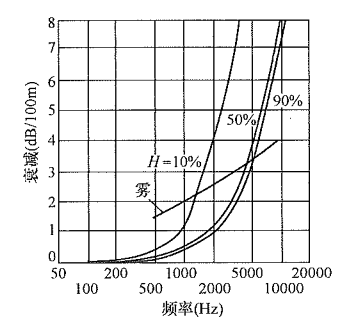


图 3-34 不同频率下声音在空气中的衰减

H—相对湿度

二、可听噪声的限值

我国颁布了 GB 3096—2008《声环境质量标准》，各类声环境功能区的环境噪声等效声级限值见表 3-27。输电线路产生的噪声随着电压的提高而增大，有必要限制输电线路产生的噪声量，因此就需要研究噪声的允许值。

按区域的使用功能特点和环境质量要求，声环境功能区分为以下五种类型。

0 类声环境功能区：指康复疗养区等特别需要安静的区域。

1 类声环境功能区：指以居民住宅、医疗卫生、文化体育、科研设计、行政办公为主要功能，需要保持安静的区域。

2 类声环境功能区：指以商业金融、集市贸易为主要功能，或者居住、商业、工业混杂，需要维护住宅安静的区域。

3 类声环境功能区：指以工业生产、仓储物流为主要功能，需要防止工业噪声对周围环境产生严重影响的区域。

4 类声环境功能区：指交通干线两侧一定区域之内，需要防止交通噪声对周围环境产生严重影响的区域，包括 4a 类和 4b 类两种类型。4a 类为高速公路、一级公路、二级公路、城市快速路、城市主干路、城市次干路、城市轨道交通（地面段）、内河航道两侧区域；4b 类为铁路干线两侧区域。

表 3-27 各类声环境功能区环境噪声限值

dB（A）

声环境功能区类别	昼间	夜间
0 类	50	40
1 类	55	45

续表

声环境功能区类别		昼间	夜间
2 类		60	50
3 类		65	55
4 类	4a 类	70	55
	4b 类	70	60

城市区域按照 GB/T 15190 的规定划分声环境功能区，分别执行上述 0、1、2、3、4 类声环境功能区环境噪声限值。

乡村区域一般不划分声环境功能区，根据环境管理的需要，县级以上人民政府环境保护行政主管部门可按以下要求确定乡村区域适用的声环境质量要求：

a）位于乡村的康复疗养区执行 0 类声环境功能区规定；

b）村庄原则上执行 1 类声环境功能区要求，工业活动较多的村庄以及有交通干线通过的村庄（指执行 1 类声环境功能区要求以外的地区）可局部或全部执行 2 类声环境功能区要求；

c）集镇执行 2 类声环境功能区要求；

d）独立于村庄、集镇之外的工业、仓储集中区执行 3 类声环境功能区要求；

e）位于交通干线两侧一定距离内噪声敏感建筑物执行 4 类声环境功能区要求。

美国根据公众对输电线路可听噪声反应提出一个一般准则，如图 3-35 所示。美国所提出的一般准则没有考虑在不同环境条件下对相同噪声的不同心理反应，如同样的噪声在雾或小雨的条件下，要比暴雨时更难忍受，而在坏天气下本底噪声和环境条件可明显地改变噪声的烦恼程度。

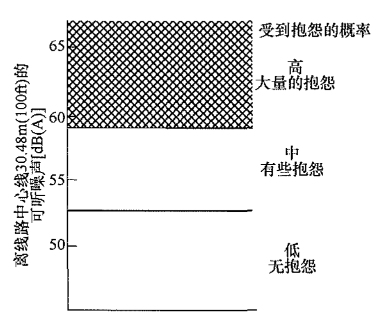


图 3-35 可听噪声引起抱怨的标准

GB 50545—2010《110kV～750kV 架空输电线路设计规范》和 GB 50665—2011《1000kV 架空输电线路设计规范》规定 110～1000kV 架空输电线路距线路边相导线投影外 20m 处，湿导线条件下的可听噪声限值应符合表 3-28 的规定。对于海拔超过规定值的线路，其可听噪声限值应进行高海拔修正。

表 3-28 可 听 噪 声 限 值

标称电压（kV）	110～750	1000
海拔（m）	≤1000	≤500
限值 dB（A）	55	

三、可听噪声的预计

对于户外记录到的实际输电线路噪声来说，电晕噪声对烦恼程度的主观评价起主要作用，交流声仅有次要的影响。然而，不考虑交流声就不能对噪声做出全面的分析。交流声在大雨、结冰、湿雪或与强烈电晕损失有关的类似条件下，尤其显著。由于空气、树木和墙壁对交流声的衰减很小，因此，在离线路较远处或在室内，它的重要性可能比电晕噪声大。

本节所列公式主要是针对电晕噪声的预计，为更完整地考虑可听噪声，也一并列出交流声的预计公式。

（一）电晕噪声的预计

1. 我国可听噪声计算公式

《345kV 及以上超高压输电线路设计参考手册》公式对由 dB（A）所确定的电晕噪声的预计，可用下述步骤进行：

（1）计算导线的最大表面电场强度 E，按式（3-63）计算。

（2）计算每相在大雨时产生的声功率 P_1（单位 μW/m），按式（3-137）求得

$$P_i = n^2\left(\frac{D}{3.8}\right)^{4.4} A_1 k_n \qquad (3\text{-}137)$$

$$A_1 = 46.4 - 665/E \qquad (3\text{-}138)$$

式中 n——分裂导线根数；

D——子导线直径，cm；

k_n——与分裂导线根数有关的系数：$n \geqslant 3$ 时，$k_n=1$；$n=2$ 时，$k_n=1.8$；$n=1$ 时，$k_n=5.6$；

i——相导线序号。

（3）用式（3-139）计算在离线路任一距离处，每相产生的声能 J_i。

$$J_i = e^{ad} k \frac{P_i}{4d} \qquad (3\text{-}139)$$

式中 a——声音在空气中的衰减系数，$a=0.0075$/m；

d——所计算处与相导线间的距离，m；

k——对无限长导线及不考虑地面反射则可取 1。

（4）将各相产生的声能 J_i 用代数法相加 $J=\sum J_i$。

（5）用式（3-140）计算以 Pa 表示的声压。

$$P = 20.5\sqrt{J} \qquad (3\text{-}140)$$

（6）将声压 p 用式（3-141）换算为以分贝表示的声压级 $P_{(dB)}$，即

$$P_{(dB)}=20\lg[p/(2\times10^{-5})] \quad (3\text{-}141)$$

（7）用上述类似方法计算湿导线条件下的可听噪声。湿导线噪声代表雾天的最大噪声或者小雨时或雨刚停后的噪声。但是，需将计算得出的大雨条件下的声能乘以系数 C 换算为湿导线条件下的声能。C 为湿导线产生的声功率和大雨时产生的声功率之比。C 可按式（3-142）求得

$$C=(63.4x^2+1.87x^3-1.15x^4)/1000 \quad (3\text{-}142)$$

式中，x=10（E/E_C－0.8），且 0.8＜E/E_C＜1.4。

$$\text{当 } n\leqslant4 \text{ 时 } E_C=\left[(12.5d-4.57)/(D-1.07)\right]\times10^{-1} \quad (3\text{-}143)$$

$$\text{当 } n>4 \text{ 时 } E_C=\frac{(12.5d-4.57)/(D-1.07)}{1+0.027(n-4)}\times10^{-1} \quad (3\text{-}144)$$

式中　d 的单位为 cm，E_C（有效值）的单位为 MV/m。

【例 3－3】 应用上述步骤计算距离 500kV 三相线路边相 15m 处的噪声。线路的参数如下：工作电压 525kV；导线 4×JL/G1A－400/35，单根导线直径为 2.682cm；分裂间距 40cm；相导线间距为 1200cm；导线离地平均高度 1500cm。

解　（1）根据计算导线最大表面电场强度有效值的方法求得 E 为

边相：1.442MV/m；

中相：1.596MV/m。

（2）按式（3-137）求得每相在大雨时产生的功率为

边相：P_i=3.685μW/m

中相：P_i=10.26μW/m

（3）离边相导线水平距离 15m 处，至三相导线的距离分别为

$$d_1=\sqrt{15^2+15^2}=21.2\text{m}$$

$$d_2=\sqrt{27^2+15^2}=30.89\text{m}$$

$$d_3=\sqrt{39^2+15^2}=41.79\text{m}$$

用式（3-139）计算出离边相 15m 处的声能为

$$J_1=\mathrm{e}^{-(0.0075\times21.2)}\frac{3.685}{4\times21.2}=0.0371\mu\text{W/m}^2$$

$$J_2=\mathrm{e}^{-(0.0075\times30.89)}\frac{10.26}{4\times30.89}=0.0659\mu\text{W/m}^2$$

$$J_3=\mathrm{e}^{-(0.0075\times41.79)}\frac{3.685}{4\times41.79}=0.0161\mu\text{W/m}^2$$

（4）$J=J_1+J_2+J_3=0.1191\ \mu\text{W/m}^2=0.1191\times10^{-6}\ \text{W/m}^2$

（5）$P=20.5\sqrt{0.1191\times10^{-6}}=0.00707\text{Pa}$

（6）$P_{(dB)}=20\lg\dfrac{0.00707}{2\times10^{-5}}=50.97\text{dB（A）}$

（7）计算湿导线条件的噪声，按式（3-142）进行声能校正。根据式（3-143）得 E_C=1.4MV/m，由式（3-142）得 C 为

边相：C=0.326

中相：C=0.653

相应的声能为：

$$J_1=0.0371\times0.326=0.0121\ \mu\text{W/m}^2$$

$$J_2=0.0659\times0.653=0.043\ \mu\text{W/m}^2$$

$$J_3=0.0161\times0.326=0.0052\ \mu\text{W/m}^2$$

$$J=J_1+J_2+J_3=0.0603\ \mu\text{W/m}^2=0.0603\times10^{-6}\ \mu\text{W/m}^2$$

$$P=20.5\sqrt{0.0603\times10^{-6}}=0.00503\text{Pa}$$

$$P_{(dB)}=20\lg\frac{0.00503}{2\times10^{-5}}=48\text{dB}$$

2. 各国可听噪声的计算公式

可听噪声的计算公式一般分为两种类型：一是适用于特定类型的经验公式；二是适用于任何类型的一般公式。

（1）适用于特定类型的经验公式。

这类型的公式都是在实际的三根相导线水平排列方式下测试和总结得到的，所以，对于这种特定几何形状、特定电压等级和特定导线参数情况，此类经验公式的准确度较高。但是因为其应用范围很窄，实际应用的也不是很多。这类公式主要包含 AEP 公式和 Ontario Hydro 公式。

1）美国电力公司（AEP）公式。具体形式如下：

$$AN=108\lg E+10\lg n+75.9\lg[(d/2.54)]^{1.35}-94.5 \quad (3\text{-}145)$$

式中　AN——可听噪声，dB；

E——中相的平均电场强度，kV/m；

n——导线分裂根数；

d——导线直径，cm。

测量条件：中雨。

适用范围：相导线水平排列的单回路，要求电压等级为 500～800kV，导线分裂根数不超过 6 根。

2）Ontario Hydro（安大略）公式。具体形式如下：

$$AN=100\lg E+40\lg n-10\lg D-77.2 \quad (3\text{-}146)$$

式中　E——中相的平均电场强度，kV/m；

D——观测点到最近边相的距离，m。

测量条件：大雨。

适用范围：相导线水平排列的单回路，要求电压等级为 230～765kV，导线分裂根数不超过 4 根，导线直径在 2.0cm 和 6.5cm 之间。

（2）适用于任何类型的一般公式。

这类型的公式是通过实验总结出单相导线所产生的可听噪声大小，然后根据式（3-147）将各相产生的可听噪声叠加，从而得到多相交流输电线路产生的总噪声大小。

$$AN=10\lg\left(\sum_{i=1}^{m}10^{AN_i/10}\right) \tag{3-147}$$

式中　AN——多相输电线路产生的总噪声，dB（A）；

AN_i——每相导线所产生的可听噪声大小，单位为 dB（A）；

m——输电线路的相数。

这类型的公式可用于任何几何形状的相导线排列，其应用范围较广，加上其计算量较小的优点，这类型的经验公式应用最广泛。

1）邦纳维尔电力局（BPA）公式。BPA 推荐的预测公式是根据各种不同电压等级、分裂方式的实际试验段上的长期实测数据推算出来的，并利用这些预测公式的结果与其他输电线路的实测结果作了比较，比较结果说明，预测值与实测值的误差绝大多数仅 1dB 左右。

具体预估公式如下：

$$SLA=10\times\lg\sum_{i=1}^{Z}\lg^{-1}\left[\frac{PWL(i)-11.4\times\lg(R_i)-5.8}{10}\right] \tag{3-148}$$

式中　SLA——A 计权声级，dB；

PWL（i）——i 相导线的声功率级，μW/m；

R_i——测点至被测 i 相导线的距离，m；

Z——相数。

式（3-148）中的 PWL 按式（3-149）计算。

$$PWL=-164.4+120\lg E+55\lg d_{eq} \tag{3-149}$$

式中　E——导线的表面梯度，kV/cm；

d_{eq}——等效直径，$d_{eq}=0.58\,n^{0.48}\cdot d$（$n>4$）

n——分裂根数；

d——子导线直径，mm。

2）日本电力中央研究所（CRIEPI）公式。具体形式如下：

$$AN=-665/E-10\lg D+AN_0 \tag{3-150}$$

式中　E——平均电场强度，kV/m；

AN_0 的选取与 n 和 d 的大小有关，具体关系见表 3-29。

表 3-29　AN_0 与 d 和 n 的关系

d \ AN_0 \ n	4	6	8	10	12
2.24	96.4				
2.53	100			102.2	100
2.85	103.4				
3.42				109.3	110.6
3.84	106.3	108.8	111.3	113.1	
4.62			116.1	116.1	
5.28			118.6	120.1	

如果计算用的 n 或 d 不在上述表格中，可以根据以下公式对变量值介于 X_1 和 X_2 之间 d 或 n 进行 AN_0 值的计算：

$$AN_0=\frac{AN_0(X_1)\lg(X/X_2)+AN_0(X_2)\lg(X_1/X)}{\lg(X_1/X_2)} \tag{3-151}$$

测试条件：大雨。

适用范围：电压等级为 500～1500kV，导线分裂根数在 4～12，导线直径在 2.24～5.28cm 范围任何形状的线路。

3）法国电力集团（EdF）公式。具体形式如下：

$$AN=15\lg n+4.5\times d-10\lg D+AN_0 \tag{3-152}$$

式中　AN_0——依赖于 E 的选取。

测试条件：大雨。

适用范围：电压等级为 400～1500kV，导线分裂根数不大于 6，导线直径在 2～6cm 范围任何形状的线路。

4）意大利国家电力能源公司（ENEL）公式。具体形式如下：

$$AN=85\lg E+18\lg n+45\lg d-10\lg D-71+k \tag{3-153}$$

式中　E——平均电场强度，kV/m；

$$k=\begin{cases}3 & 当\ n=1\ 时\\ 0 & 当\ n\geqslant 2\ 时\end{cases}。$$

测试条件：大雨。

适用范围：电压等级为 400～1200kV，导线分裂根数不超过 10 根，导线直径在 2～5cm 范围任何形状的线路。

5）德国 FGH 公式。具体形式如下：

$$AN=2E+18\lg n+45\lg d-10\lg D-0.3 \tag{3-154}$$

式中　E——平均电场强度，kV/m。

测试条件：最大雨。

适用范围：导线分裂根数不超过 6 根，导线直径在 2～6cm 范围任何形状的线路。

6）通用电气公司（GE）公式。其 L_5 噪声的形式

如下：

$$AN_5 = -665/E + 20\lg n + 44\lg D - 10\lg D - 0.02D + AN_0 + K_1 + K_2 \quad (3\text{-}155)$$

式中　E——平均电场强度，kV/m；

$$AN_0 = \begin{cases} 75.2, & \text{当 } n < 3 \text{ 时} \\ 67.9, & \text{当 } n \geqslant 3 \text{ 时} \end{cases};$$

$$K_1 = \begin{cases} 7.5, & \text{当 } n = 1 \\ 2.6, & \text{当 } n = 2 \\ 0, & \text{当 } n \geqslant 3 \end{cases};$$

$$K_2 = \begin{cases} 0, & \text{当 } n < 3 \\ 22.9(n-1)d/B, & \text{当 } n \geqslant 3 \end{cases};$$

B——相导线等效半径。

其 L_{50} 的噪声如下计算：

$$AN_{50} = AN_5 - \Delta A \quad (3\text{-}156)$$

$$\Delta A = \begin{cases} 14.2E_c/E - 8.2, & \text{当 } n < 3 \\ 14.2E_c/E - 10.4 - 8[(n-1)d/B], & \text{当 } n \geqslant 3 \end{cases};$$

$$E_c = \begin{cases} 24.4(d^{-0.24}), & \text{当 } n \leqslant 8 \\ 24.4(d^{-0.24}) - 0.25(n-8), & \text{当 } n > 8 \end{cases}。$$

测试条件：大雨。

适用范围：电压等级为 230～1500kV，导线分裂根数不超过 16 根，导线直径在 2～6cm 范围任何形状的线路。

7）魁北克水电局（IREQ）公式。具体形式如下：

$$AN = 72\lg E + 227\lg n + 45.8\lg d - 11.4\lg D - 57.6 \quad (3\text{-}157)$$

式中　E——平均电场强度，kV/m。

测试条件：最大雨。

适用范围：电压等级为 345～1500kV，导线分裂根数不少于 2 根的任何形状线路。

3. 特高压线路的电晕噪声

在常规工程的线路参数下，750kV 及以下线路工程的电晕噪声一般均低于国标的限值。随着电压等级的提高，1000kV 特高压线路工程的电晕噪声成为工程设计的限值因素。

采用 BPA 推荐公式，按 1000kV 8 分裂导线，下导线高度 25～45m，计算不同导线排列方式情况下的电晕噪声如图 3-36～图 3-39。

由图 3-38 可看出，当采用相同分裂方式及导线截面的相导线间越紧凑，边线外 20m 处的可听噪声越大。

根据中国电科院对运行的 1000kV 双回路输电线路的可听噪声的实测分析，我国特高压双回线路的可听噪声可将按式（3-148）预计的值减少 2dB。

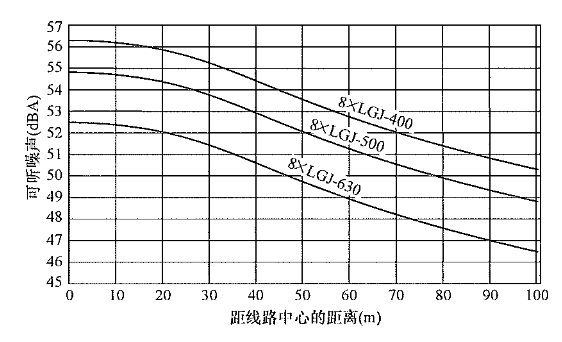


图 3-36　单回路水平排列Ⅳ Ⅰ 串 8 分裂导线可听噪声的分布

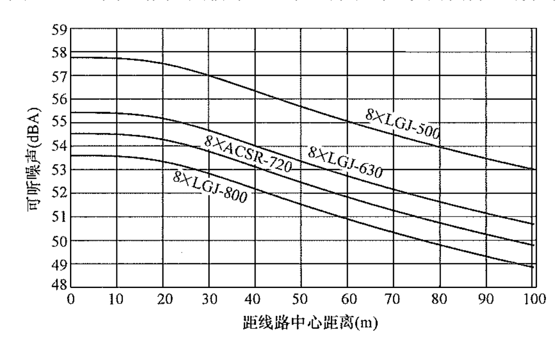


图 3-37　双回路 Ⅰ 串逆相序 8 分裂导线可听噪声的分布

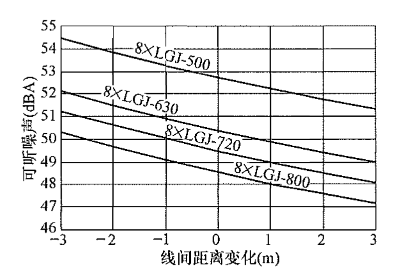


图 3-38　单回路水平排列线间距离变化可听噪声的分布

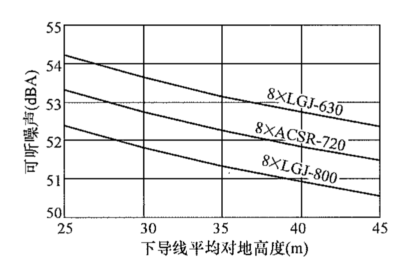


图 3-39　双回路下导线平均高度与可听噪声的关系

（二）交流声的预计

通过下列步骤可确定大雨时交流声（120Hz）的水平（因为以下所列公式系采用美国提出的方法和数据计算的，而美国电力商用频率为 60Hz，故其双倍工频为 120Hz）。

（1）计算每相的最大表面电场强度有效值 E。

（2）根据式（3-158）求出所产生的声功率，即

$$P_1 = 53.5 - 50.55/E \quad (3\text{-}158)$$

式中　P_1——产生的声功率，dB；

E——导线表面最大电场强度有效值，MV/m。

（3）根据式（3-159）对导线直径进行校正。

$$C_d = 10.6 - 41/D \tag{3-159}$$

式中 C_d——直径校正系数，dB；

D——导线直径，cm。

（4）根据式（3-160）对分裂导线根数进行校正。

$$\left.\begin{aligned}&\text{当 } D = 4.63\text{cm 时}, C_n = 24.1 - 390/(n+10)\\&\text{当 } D = 2.3\text{cm 时}, C_n = 47.4 - 1000/(n+15)\end{aligned}\right\} \tag{3-160}$$

式中 C_n——对导线根数 n 的校正系数，dB；

n——分裂导线根数。

如果导线直径不同于 4.63cm 和 2.3cm 时，则可用线性内插法或外推法求得 C_n。

校正后每相产生声功率为

$$P_i = P_1 + C_d + C_n$$

（5）将以 dB 表示的声功率变换为以 W/m 表示。

（6）根据产生的功率和声压之间的关系用式（3-161）计算出声压

$$P = p^2 H / \delta c \tag{3-161}$$

式中 P——产生的声功率，W/m；

p——声压，Pa；

H——H=2πR，R 为导线至所计算点之间的距离，m；

δ——空气密度，kg/m³；

c——声波传播速度，m/s（对于标准大气条件 $\sqrt{\delta c}$ =20.5）。

确定每相的直达波与反射波的声压 $p_{i.d}$ 和 $p_{i.r}$，对三相线路的校正如下

$$\left.\begin{aligned}p_{i.d} &= \sqrt{2} \times \frac{\sqrt{\delta c P_i}}{2\pi d_{i.d}} \times \cos(\omega t - \varphi_i - 2\pi d_{i.d}/\lambda)\\p_{i.r} &= \sqrt{2} k \times \frac{\sqrt{\delta c P_i}}{2\pi d_{i.r}} \times \cos(\omega t - \varphi_i - 2\pi d_{i.r}/\lambda)\end{aligned}\right\} \tag{3-162}$$

式中 φ_i——i 相电压的相位角；

$d_{i.d}$——i 相至所计算点的距离；

$d_{i.r}$——i 相的镜像至所计算点之间的距离；

k——反射系数，对 120Hz 近似等于 1；

λ——120Hz 声波的波长（λ=2.85m）。

（7）把声压波按量值和相位相加求得交流声。

由于交流声系按量和相位相加，在一些位置上声压波互相叠加，而在另一些位置上声压波的相位又相反，其结果随离地面的高度不同和横向距离的变化而变化很大。甚至上列参数之一的细小变化，就可能使声压级局部变化高达 20dB。因此，交流声压级不能简单地确定，必须求得所计算处的最大可能值。

第七节 电 磁 效 应

在电力设备和输电线路附近以及在变电站内存在有工频电场和磁场，由此引起的静电效应和电磁影响，是电力系统和其他有关部门所关心的问题。随着线路电压等级的提高，静电效应变得越来越突出。当世界上出现 500kV 及以上电压的超高压输电线路后，静电效应已成为人们关注的问题。因此，选择输电线路和附近物体之间的净距，除考虑电气强度因素外，还必须考虑静电效应这一重要因素。静电效应包括耦合电流、感应电压和感应能量所产生的影响。

本节提出了静电效应的计算方法、输电线路静电场对人类和动物生态的影响和设计中应考虑的对策。

一、电场效应

各种“静电效应”是用静电耦合电流、感应电压和感应能量来表征的。研究表明，对于各种情况（如输电线邻近的房屋、车辆等），这些物理量取决于该物体的几何形状和参数，并取决于地面电场强度。由于静电效应与电场强度密切相关，因而把电场强度当作静电效应的一个设计参量。

（一）电场强度及其计算

这里所说的电场强度是指要估计静电效应的物体还未进入电场，电场尚未产生畸变时的电场强度。

下面讨论地面平坦、导线水平、线路下面没有任何物体的情况下，理想的电场强度。所述的方法，对于各种导线布置方式的单回和双回输电线路，以及线下设置有多根和线路平行的屏蔽线等情况都是适用的。对于输电线路的每相导线，包括处于地电位的导线（如地线），都应加以考虑。对于分裂导线，计算中采用等值单导线来代替，因为这样可使计算简化并有足够的准确性。

按上述理想情况并假设输电线路为无限长且平行地面，地面为导体（电阻率小于 $10^5\Omega \cdot m$），则空间场强可简化为二维场计算。

1. 分析计算法

导线上的电荷 Q 可用电压和电位系数 p 的麦克斯韦方程式求得

$$[Q] = [p]^{-1}[U] \tag{3-163}$$

式中：电位系数 p 见式（3-40）、式（3-41）。

i 导线上的电荷在线下空间任意点 ρ 产生的电场强度 $\dot{E}_{\rho i}$ 的计算，Q_i、$-Q_i$ 如图 3-40 所示。

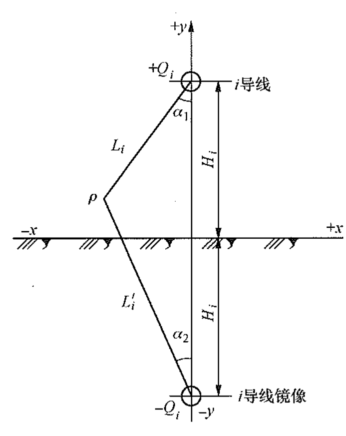


图 3-40　线下任意点电场强度计算参数图

$$\dot{E}_{\rho i}=E_{\rho vi}+jE_{\rho Hi} \tag{3-164}$$

$$E_{\rho i}=\sqrt{E_{\rho vi}^2+E_{\rho Hi}^2} \tag{3-165}$$

$$E_{\rho vi}=\frac{Q_i}{2\pi\varepsilon}\left[\frac{H_i-y}{(H_i-y)^2+(x_i-x)^2}+\frac{H_i+y}{(H_i+y)^2+(x_i-x)^2}\right] \tag{3-166}$$

$$E_{\rho Hi}=\frac{Q_i}{2\pi\varepsilon}\left[\frac{x_i-x}{(H_i-y)^2+(x_i-x)^2}-\frac{x_i-x}{(H_i+y)^2+(x_i-x)^2}\right] \tag{3-167}$$

式中　$E_{\rho vi}$，$E_{\rho Hi}$——分别为 $\dot{E}_{\rho i}$ 垂直和平行地面的分量，kV/m；

Q_i，$-Q_i$——分别为 i 导线及其镜像上单位长度的电荷，K；

x，y——ρ点的平面坐标；

x_i——i 导线的 x 坐标值，m；

H_i——i 导线的对地高度，m。

对于 n 相导线在空间ρ点产生的场强，采用叠加原理则得

$$E_{\rho v}=\sum_{i=1}^{i=n}E_{\rho vi}=\sum_{i=1}^{i=n}\frac{Q_i}{2\pi\varepsilon}\left[\frac{H_i-y}{(H_i-y)^2+(x_i-x)^2}+\frac{H_i+y}{(H_i+y)^2+(x_i-x)^2}\right] \tag{3-168}$$

$$E_{\rho H}=\sum_{i=1}^{i=n}E_{\rho Hi}=\sum_{i=1}^{i=n}\frac{Q_i}{2\pi\varepsilon}\left[\frac{x_i-x}{(H_i-y)^2+(x_i-x)^2}-\frac{x_i-x}{(H_i+y)^2+(x_i-x)^2}\right] \tag{3-169}$$

$$\left.\begin{aligned}\dot{E}_{\rho}&=E_{\rho v}+jE_{\rho H}\\ E_{\rho}&=\sqrt{E_{\rho v}^2+E_{\rho H}^2}\end{aligned}\right\} \tag{3-170}$$

由式（3-163）解出 Q_i 值后即可计算ρ点场强 E_ρ。

2. 计算步骤及流程

计算步骤如下：

（1）首先确定各相导线、地线和屏蔽线的几何位置，在档距中央垂直于线路方向取一截面，将地面取作 X 轴，对称的单回路取 Y 轴通过中相，对双回路取 Y 轴通过两回路的对称轴。各相导线、地线和屏蔽线的位置，按此坐标定位。

（2）计算导线的电位系数 a_{ii} 和 a_{ij}。

（3）按式（3-163）麦克斯韦方程求解每根导线上的电荷。为使一般计算机能进行计算，求解时将电压和电荷分成实部和虚部分别求解。

（4）计算线下空间各点对地电压实部和虚部，最后求得所计算点的对地电压。

（5）计算线下空间各点电场强度的垂直和水平分量。

（6）计算空间各点合成场强的最大值，最小值及其所在方向。

三相线下各点空间场强是一个旋转相量，其大小随着方向的改变而变化，在某一方向有最大值。因此，先任意给定空间方向，求场强垂直分量和水平分量在该方向的相量和，将该相量对方向角求导数并令其等于零，最后可求出场强的最大值、最小值及其所在的方向。计算程序的流程如图 3-41 所示。

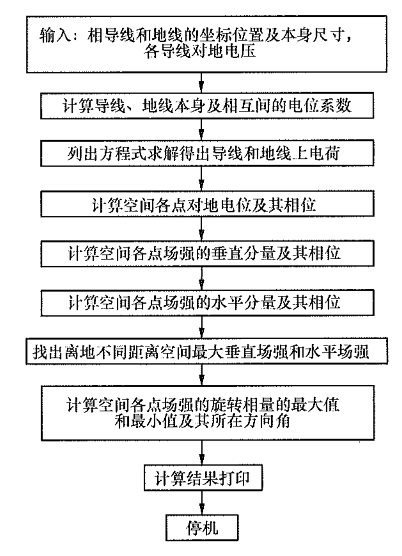


图 3-41　架空输电线下空间场强的计算流程图

众所周知，只是某些比较简单的布置形状的电场才能用分析计算。为了计算诸如杆塔、相互跨越的母线等复杂结构的电场，可利用包括电荷模拟法、有限差分法和有限元素法以及蒙特卡诺法等。此外还可利

用模型法，用高频电压（为增加测量的灵敏度）加到模型装置上，借助于特殊测量电极逐点画出的电场图，确定相应的电场强度。

3. 输电线下地面的电场强度及影响场强的因素

（1）输电线下地面的电场强度。

图3-42是单回路导线水平排列情况几种电压的地面电场分布曲线。图中曲线系按1.05倍额定电压计算的电场强度。由图可看出地面最大电场强度产生在边线外约1m处。我国运行的220kV线路地面最大电场强度为4.5kV/m；330kV线路为8.4kV/m；500kV以上线路约为10kV/m。

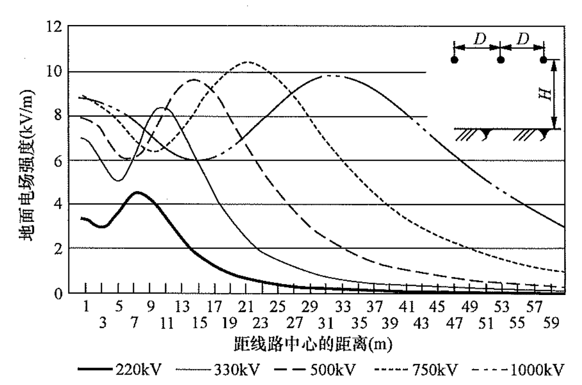


图3-42 导线水平排列情况各种电压线路的地面场强分布

220kV—JL/G1A－400/35，D=6.5m，H=6.5m；

330kV—2×JL/G1A－300/40，D=9m，H=7.5m；

500kV—4×JL/G1A－400/35，D=13m，H=11m；

750kV—6×JL/G1A－400/35，D=19.3m，H=15.5m；

1000kV—8×JL/G1A－500/45，D=30m，H=22m

图3-43是500kV和1000kV双回路的地面电场分布曲线。500kV导线为4×JL/G1A－400/35，1000kV导线为8×JL/G1A－500/45。图示曲线表明两个回路的相序排列对地面电场强度的影响较大。对称排列的正相序地面电场强度最大而导线的表面电场强度最小，逆相序排列的地面场强最小而导线的表面场强最大。当一回路带电和另一回路停电接地的情况下，地面电场强度介于正相序和逆相序排列电场强度之间。

上述地面场强的计算考虑了地线的影响。

（2）影响地面场强的因素。

1）导线对地距离。图3-44和图3-45分别是500kV和1000kV线路，相导线水平排列与三角形排列，在不同导线对地距离情况下的地面场强分布曲线。由图3-44和图3-45看出随着导线对地距离增加，线下地面最大场强降低较快，而500kV线路距边线15m以外、1000kV线路距边线30m外的场强变化较缓。当导线对地距离增加到一定高度，距线路中心不同距离各点的场强相差很小。

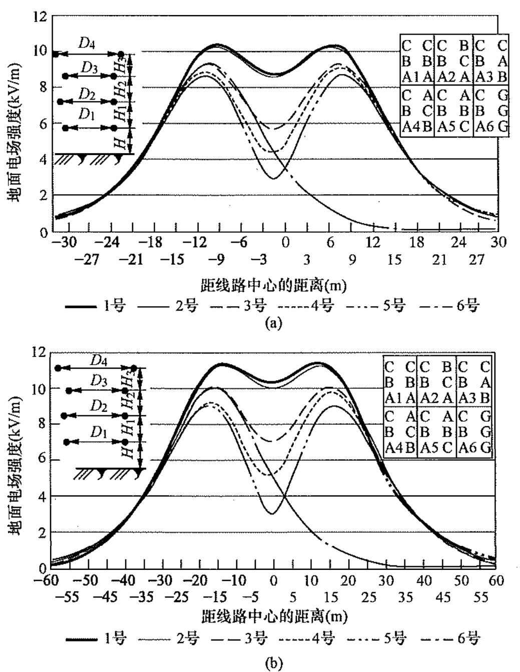


图3-43 双回路不同相序布置时地面场强分布

（a）500kV D_1=18m，D_2=22m，D_3=16m，D_4=20m，H=11m，H_1=10m，H_2=10m，H_3=11m

（b）1000kV D_1=34.1m，D_2=30.6m，D_3=30m，D_4=36m，H=21m，H_1=19.6m，H_2=19.3m，H_3=15m

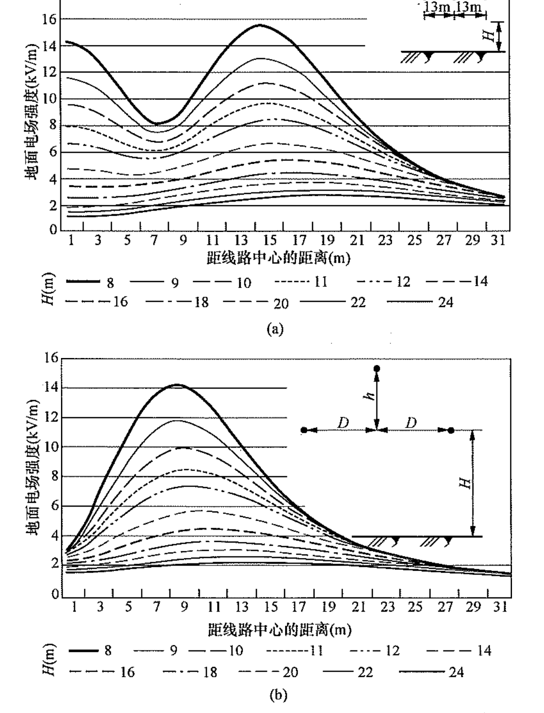
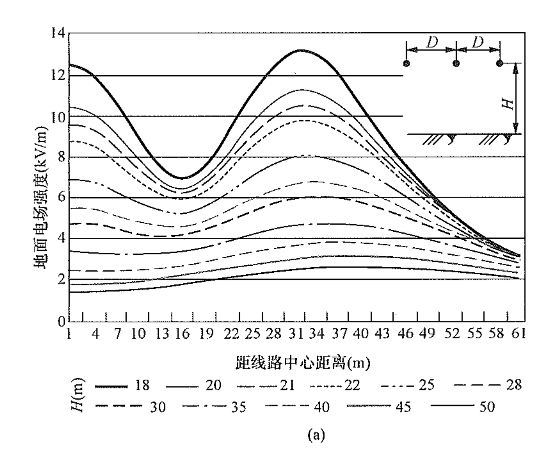


图3-44 500kV线路不同对地距离的地面场强分布

（a）500kV导线水平排列 D=13m；

（b）500kV导线三角形排列 D=7m，h=6m



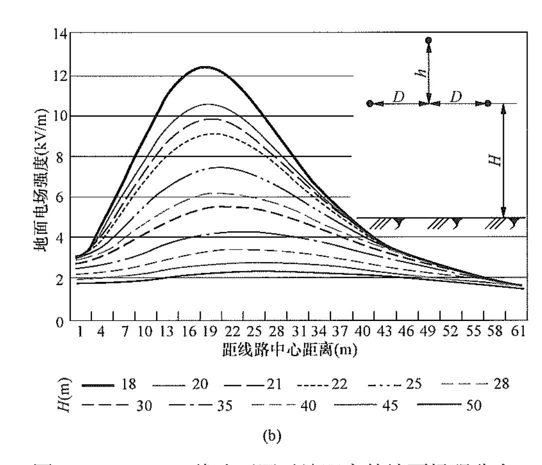


图 3-45　1000kV 线路不同对地距离的地面场强分布

（a）1000kV 导线水平排列 D=30m；

（b）1000kV 导线三角排列 D=16m，h=17m

图 3-46 为不同导线对地距离的地面最大电场强度。由图看到 500kV 线路当导线对地距离由 8m 增大到 24m，开始增加对地距离时最大场强降低较快，继续增大导线对地距离，则最大场强降低逐渐减小。如对地距离由 8m 增至 9m，最大场强降低约 2.4kV/m；而对地距离由 16m 增至 17m 时，最大场强降低约 0.45kV/m。其他电压等级的线路情况也类似。由此推断：当导线对地距离大到一定程度时，采用增大对地距离来降低地面场强则效果不明显，从经济上考虑也不合适。

2）相导线的布置。图 3-47 为单回路 500kV 和 1000kV 线路、导线不同对地距离、导线呈水平与三角形排列的地面最大场强。由图看出，在相同对地距离及满足绝缘间隙要求的条件下，三角形排列的最大场强较水平排列约低 1.2～2kV/m。比较图 3-44 和图 3-45 还可看到，三角形排列地面处于高场强区的范围较水平排列小，如以 500kV 线路 11m 对地距离为例，场强高于 6kV/m 的区域，三角形排列约为 20m，而水平排列则约为 44m。因此，从静电感应观点看，导线呈三角形排列较好，不仅最大场强低，而且高场强范围小。

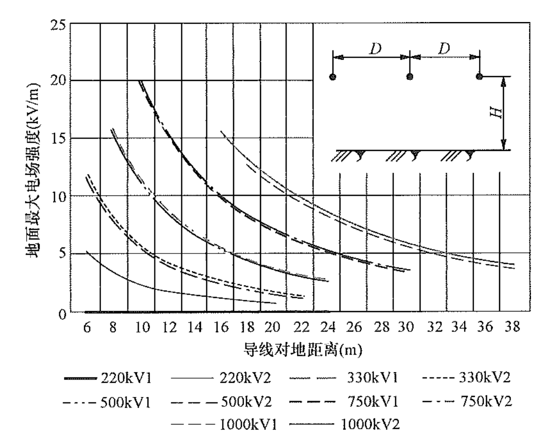


图 3-46　不同导线对地距离的地面最大电场强度

220kV1—JL/G1A－300/40，D=6.5m，H=6.5m

220kV2—JL/G1A－300/40，D=8m，H=6.5m

330kV1—2×JL/G1A－300/40，D=9.0m，H=7.5m

330kV2—2×JL/G1A－300/40，D=11.0m，H=7.5m

500kV1—4×JL/G1A－400/35，D=13m，H=11m

500kV1—4×JL/G1A－400/35，D=15m，H=11m

750kV1—6×JL/G1A－400/35，D=19.3m，H=13.7m

750kV2—6×JL/G1A－400/35，D=21.3m，H=13.7m

1000kV1—8×JL/G1A－500/45，D=25.0m，H=22m

1000kV2—8×JL/G1A－500/45，D=30.0m，H=22m

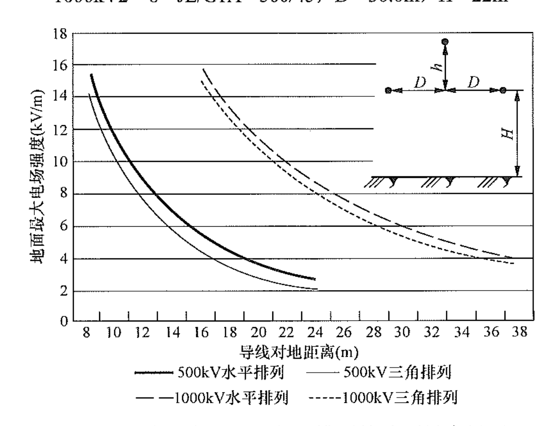


图 3-47　线路水平和三角形排列的地面最大场强

500kV—4XJL/G1A－400/35，水平排列 D=13m，h=0m，三角排列 D=7m，h=6m

1000kV—8XJL/G1A－500/45，水平排列 D=30m，h=0m 三角排列 D=16m，h=17m

导线布置对地面场强影响的另一因素是线间距离。根据 500kV 线路计算，若是水平排列，线间距离每增加 1m 地面场强约增大 0.1～0.3kV/m。若呈三角形排列，水平线间距离每增加 1m 地面场强约增大 0.35kV/m，而垂直线间距离每增加 1m 场强约增加

0.1kV/m。

3）相导线根数。超高压输电线路为了限制导线产生的电晕，常常采用分裂导线。但是，分裂导线根数增多，其对地电容增大，从而导线上蓄积电荷增多造成地面电场强度增大。为了估计分裂导线根数对地面场强的影响，按导线水平排列、相间距离 14m 及对地距离 10m，就 500kV 线路采用双分裂、三分裂及四分裂导线，计算得地面场强与导线表面场强见表 3-30。

表 3-30 分裂导线根数对地面场强的影响

相导线	2×LGJQ－700	3×LGJQ－400	4×LGJQ－300
导线表面最大场强（MV/m）	2.42	2.39	2.24
地面最大场强（kV/m）	9.55	10.42	11.27
地面最大场强相对值（%）	100	109.1	118

由表 3-30 看出 3 种相导线表面最大场强均在允许范围内，但四分裂导线的地面最大场强比双分裂导线增大了 18%，场强的绝对值增大 1.72kV/m，这一因素在设计选择相导线结构时值得注意。

1980 年，国际大电网会议根据各国研究成果正式发表了公告，认为“过去对电场的危险影响作了过高的估计”，说明现有高压输电线路的电场强度对人体无害，离允许的电场强度值还有很大的安全裕度。

（二）地面各种物体上电流和电压的预估

对静电场源和导线上的表面电荷都影响不大的物体，当其靠近地面并处在静电场中时，该物体上充电电流和电压的计算方法如下。

1. 一般公式

设靠近地面的物体 M 位于一条三相输电线路附近，如果物体 M 对地完全绝缘，则其等效电路图如图 3-48（a）所示；物体 M 接地时，则如图 3-48（b）所示。图中 a、b、c 分别代表三相导线，$\dot{U}_a$、$\dot{U}_b$、$\dot{U}_c$ 分别为各相的电压。

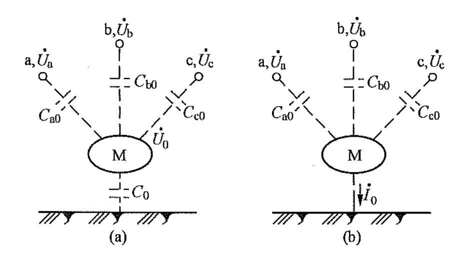


图 3-48 电力线下物体的等效电路

图 3-48 中物体 M 的电位和电荷关系的一般静电方程式可以写成

$$Q = U_0C_0 + U_aC_{a0} + U_bC_{b0} + U_cC_{c0} \quad (3\text{-}171)$$

在图 3-48（a）的情况，因该物体对地绝缘，故 $Q=0$，则“悬浮”电位 U_0 为

$$U_0 = -\frac{U_aC_{a0} + U_bC_{b0} + U_cC_{c0}}{C_0}$$

要注意到静电感应耦合系数 C_{i0} 为负，故电位 U_0 与 U_a、U_b、U_c 同符号。

式中的电容系数 c 与图 3-48（a）和（b）所示的电容 C 之间存在以下关系

$$C_{i0} = -c_{i0}C_0 = c_0 - \sum c_{i0}$$

实际上，因 $\sum c_{i0} \ll c_0$，故 C_0 与 c_0 几乎无区别。

在图 3-48（b）的情况，因物体为零电位，故得感应电荷 Q 为

$$Q = U_aC_{a0} + U_bC_{b0} + U_cC_{c0} \quad (3\text{-}172)$$

在交流正弦情况下，电荷 Q 与充电电流 $\dot{I}_0$ 的关系，可用式（3-173）表示为

$$\dot{I}_0 = -\mathrm{j}\omega Q \quad (3\text{-}173)$$

根据上述关系式，可得到下列方程组

$$\left.\begin{aligned} \dot{I}_0 &= -\mathrm{j}\omega(\dot{U}_aC_{a0} + \dot{U}_bC_{b0} + \dot{U}_cC_{c0}) \\ \dot{U}_0 &= \frac{\dot{I}_0}{\mathrm{j}\omega C_0} \end{aligned}\right\} \quad (3\text{-}174)$$

按照式（3-174）可以把物体 M 和大地看成具有开路电压为 $\dot{U}_0$ 和短路电流为 $\dot{I}_0$ 的电源的两端，该源的内阻抗为 $Z_i = \dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_0}$，其等效图为图 3-49（a）。若有一阻抗 Z 连接到这个电源上，则流经这个阻抗的电流 $\dot{I}$ 和在阻抗两端的电压 $\dot{U}$ 可直接按图 3-49（b）求出。

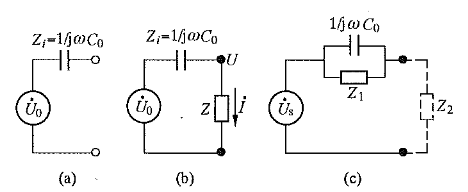


图 3-49 不同放电条件下的等效电路

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_0}{Z + \dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_0}} = \frac{\dot{I}_0}{1 + \mathrm{j}\omega C_0 Z} \quad (3\text{-}175)$$

$$\dot{U} = \dot{U}_0\frac{Z}{Z + \dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_0}} = \dot{I}_0\frac{Z}{1 + \mathrm{j}\omega C_0 Z} \quad (3\text{-}176)$$

式（3-174）确定了等效电源的三个变量 $\dot{U}_0$、C_0、$\dot{I}_0$ 之间的相互关系。因此，只要知道其中两个变量就可以解决一般的问题。在某些情况下 $\dot{I}_0$ 和 C_0 容易求得，而另一些情况下 $\dot{U}_0$ 和 C_0 容易求得。因此在解决具体问题时应根据实际情况先解容易求得的

两个量。

由式（3-175）和式（3-176）可看到，当 $\omega C_0 Z \ll 1$ 时，流经 Z 的电流实际上等于 $\dot{I}_0$ 即是说流过 Z 的是充电电流。需要指出在通常情况下 $\omega C_0 Z \leqslant 1$。

有些情况有必要把阻抗 Z 看作是由 Z_1 和 Z_2 两个并联支路构成。一个支路 Z_1 是固有回路的组成部分，另一支路 Z_2 是临时附加的。当物体 M 有泄漏阻抗时就属这种情况，其等效电路如图 3-49（c）所示。显然固有的"开路电压"不再等于 $\dot{U}_0$，但其值 $U_s < U_0$，当泄漏为纯电导时固有支路为一电阻 R，则

$$\dot{U}_s = \dot{U}_0 \times \frac{\mathrm{j}RC_0\omega}{1+\mathrm{j}RC_0\omega}$$

等效电源的内阻抗为

$$Z_i' = \frac{R}{1+\mathrm{j}RC_0\omega}$$

由此可以看出，短路电流值为 U_s / Z_i'，其值仍然是 I_0。

2. 物体感应电压 U_0 的预估

若整个物体处于一个等位面内，感应电压（开路电压）就易于确定。平行于线路的水平延伸导线就属于这种情况，近似于水平的金属板，如小屋顶也类似这种情况。平行于线路的物体，其尺寸可能相当大，如在平坦地面上的水平导线，在档距最低点两侧都是100m，按等位面计算也不会引起很大的误差。因此，当导线与线路轴线平行时，其电压可简单表示为

$$U_0 = EH \tag{3-177}$$

式中 E——导线全长的准恒定电场，kV/m；

H——导线在地面上高度，m。

若导线为水平的，但不再平行于线路时，它的电压可由下式进行计算

$$\dot{U}_0 = \frac{H}{x_2 - x_1} \times \int_{x_1}^{x_2} E \cdot \mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi}\mathrm{d}x \tag{3-178}$$

式中 x——沿导线长度段（$x_2 - x_1$）所取的计算点；

$E \cdot \mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi}$——在 x 点考虑了相角关系以后的电场。

稍倾斜（如 1/5 的斜度）的金属顶，若在金属顶面积范围内的静电场从一点到另一点变化不大，则其电压可估计为

$$U_0 = \bar{E} \cdot \bar{H} \tag{3-179}$$

式中 $\bar{E}$——平均电场，kV/m；

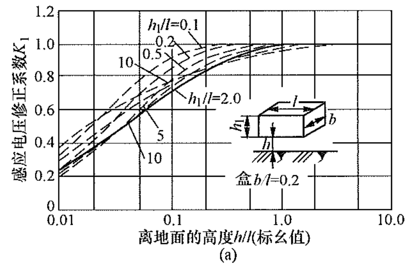
$\bar{H}$——金属顶的平均离地高度，m。

对于大的物体，则不可再采用简单方法计算它的电压。图 3-50（a）和（b）给出两种典型形状物体的 U_0 预计值，一个为一平面平放的长方形盒，一个为垂直的圆柱体。若 h 为物体底边在地面上的高度，则修正系数 K_1 可由降低参数 h/l 及 h_1/l 的函数来确定，因此

$$U_0 = K_1 EH$$

式中 H——物体离地面的平均高度，其值为

$$H = h_1/2 + h$$



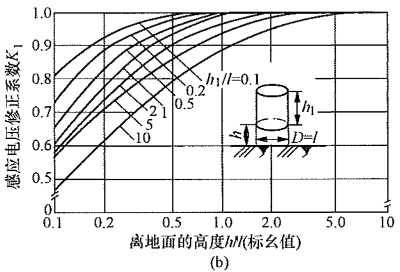


图 3-50 感应电压修正系数 K_1 随离地面的高度 h 而变化

（a）长方形的盒；（b）垂直的圆柱体

3. 电容 C_0 的预估

只有少数形状的物体，当靠近地面时能进行较准确的估计。如水平的圆柱体，其单位长度的电容可表示为

$$C_0 = \frac{4\pi\varepsilon_0}{\ln\dfrac{H+\sqrt{H^2-r^2}}{H-\sqrt{H^2-r^2}}} \tag{3-180}$$

式中 H——圆柱体的轴心离地面的高度，即 $H=h+r$，m；

r——圆柱体的半径，m；

ε_0——介电常数，$\varepsilon_0 = \dfrac{1}{36\pi \times 10^9}$，F/m。

水平圆柱体可用来代替相似形状的物体，譬如长的车辆（卡车或公共汽车）。

球体：在自由空间一个绝缘球的电容为 $C = 4\pi\varepsilon_0 r$，r 为球的半径。当这个球接近地面时，电容随图 3-51 中曲线绘出的系数 K_2 的增加而增大，K_2 为降低参数 r/h 的函数。即

$$C_0 = 4\pi\varepsilon_0 r K_2 \tag{3-181}$$

栅栏和檐沟对地电容为

$$C_0 = \frac{2\pi\varepsilon_0 L}{\ln\dfrac{2h}{GMR'}} \tag{3-182}$$

式中 L——长度，m；

h——对地高度，m；

GMR'——物体的静电几何平均半径，m。

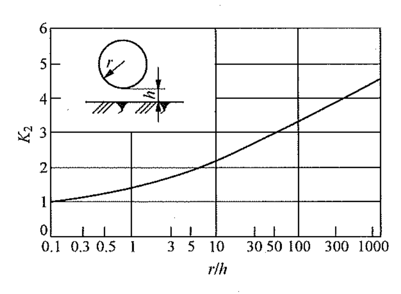


图 3-51 地面上球体的电容随高度而变化

对于檐沟、建筑物构架的电导率将使电容增大，并且有明显的泄漏。

平板和金属物顶，靠近地面的大型平板的电容近似地为

$$C_0 = \varepsilon_0 A / h \tag{3-183}$$

式中 A——平板的面积，m^2；

h——平板对地面的高度，m。

如果平板很大，平行输电线路的长度远大于其宽度，且离地很高时，平板将收敛为像栅栏和檐沟那样的平行导线，可按式（3-182）近似地求出单位长度的电容来预计，此时的 GMR′ 为平板的静电几何平均半径。

其他大型物，对在图 3-50（a）和（b）已叙述过的典型体积而言，可用图 3-52（a）和（b）估计其电容 C_0。为此，首先用下式求出空间绝缘物体的电容

$$C = 4\pi\varepsilon_0 \frac{l+b+h_1}{3} \tag{3-184}$$

然后，将这个电容乘以从图 3-52（a）和（b）曲线查出的修正系数 K_3，就得到接近地面物体的电容为

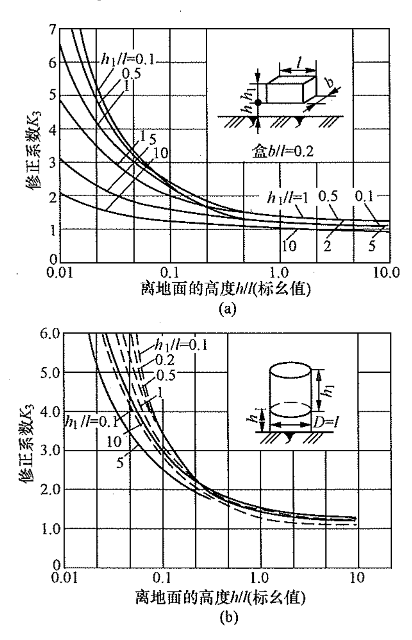


图 3-52 电容修正系数 K_3 随地面上高度 h 而变化
（a）长方形的盒；（b）垂直的圆柱体

$$C_0 = K_3 C \tag{3-185}$$

除上述情况物体的 C_0 可估计外，其他情况的电容就只能实际测量。

下面列出 J.G.安德生等在《345 千伏及以上超高压输电线路设计参考手册》中有关人、畜和物体对地电容的测量数据供参考。

对人、马、奶牛在正常站立位置时在 5cm 绝缘上测得的电容见表 3-31。

表 3-31 人、马、奶牛的对地电容

名 称	电容（pF）
人：身高 1.8m，体重 105kg 身高 1.75m，体重 68kg	110 100
马：长 2.03m，肩高 1.26m，腹部宽度 0.6m，体重 385kg	180
奶牛：长 2.03m，肩高 1.17m，腹部宽度 0.4m，体重 318kg	200

对人和物体在有 5cm 绝缘的干燥路面上测得的典型电容值列于表 3-32。

表 3-32 人和物体的对地电容

名称	电容（pF）
人	100
人手拿工具（如加油管）	150
小型车辆	700
小汽车	800
带客卡车	900
标准的大型汽车	1000
起重汽车	1000
货车	1200
巡线车	1200
高空作业人员	1900
大型轿车	2000
特大卡车	≥3000

注 潮湿路面可使电容的数值增高。

4. 充电电流 $\dot{I}_0$ 的预估

对于形状简单的物体可按前述分别估算出 $\dot{U}$ 和 C_0，则 $\dot{I}_0$ 就可立即求得为

$$\dot{I}_0 = \dot{U}_0 \mathrm{j}\omega C_0 \tag{3-186}$$

但是这种方法不适用于形状复杂的物体。计算充电电流的一般方法是求出物体表面 A 上任一点的电场强度 E（A）。根据经典静电学，这个电场强度和电荷

密度 σ 的关系为

$$\sigma = \varepsilon_0 E \tag{3-187}$$

在交变电场中，在物体内的交变电荷密度与其电流密度是对应的，即

$$J = \mathrm{j}\omega\sigma = \mathrm{j}\omega\varepsilon_0 E \tag{3-188}$$

因此，总的充电电流可由积分求得为

$$\dot{I}_0 = \mathrm{j}\omega\varepsilon_0 \int_A E(A)\mathrm{d}A \tag{3-189}$$

如果考虑到输电线路在地面附近形成的电场强度 $\dot{E}$ 均匀，则式（3-189）可写成

$$\dot{I}_0 = \mathrm{j}\omega\varepsilon_0 EA' \tag{3-190}$$

分析式（3-190）可看到 ω 和 ε_0 均为已知常数，电场 $\dot{E}$ 系为物体未放入前未畸变的电场强度，可由前述求得，余下的只是求等效面积 A' 的问题。

根据我们的模拟测量和美国特高压试验基地在物体模型的测量结果，及分析研究，提出了求取等效面积 A' 的下列数据。

（1）长方形物体：要准确计算某些物体的形状通常是困难的，如汽车有各式各样的外形，因此需要用等价物体来代替，代替车辆合适的等价物体是长方体。考虑到车辆可能的尺寸，模测了宽度 3m 以下长方体的 $\dot{I}_0$，根据测量数据分析后，车辆的等效面积 A' 可用下式计算

$$A' = Kah_1$$

式中 h_1——物体离地的平均高度；

K——数值由图 3-53 查得。

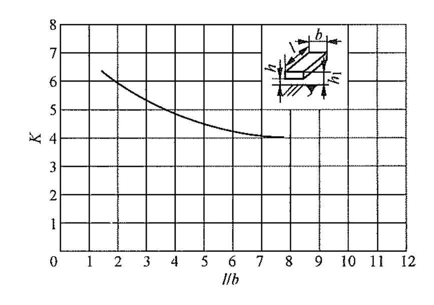


图 3-53 估计长方形体的 K 值曲线

对于一般长方体可用图3-54所示曲线求得等效面积 A'。

（2）平板和金属屋顶：其等效面积可用图 3-55 所示的曲线查得。

（3）电视和调频天线：普通的家庭用电视天线有大量结构上的细节会影响 $\dot{I}_0/\dot{E}$ 的比值。因此，要给出所有可能的几何形状均适用的通用曲线是困难的，但可按《345 千伏及以上超高压输电线路设计参考手册》（J.G.安德生等著）352～354 页资料估算天线电流。

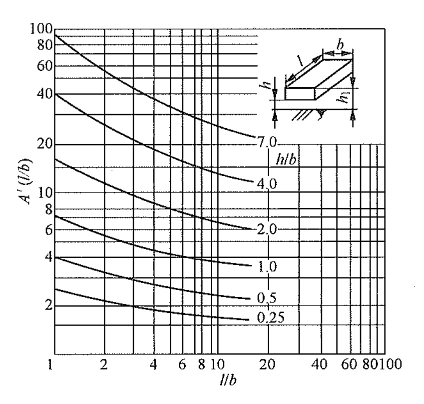


图 3-54 估算矩形物体等效面积 A' 的曲线

（曲线是为 h/h_1 <1/6 而得出的）

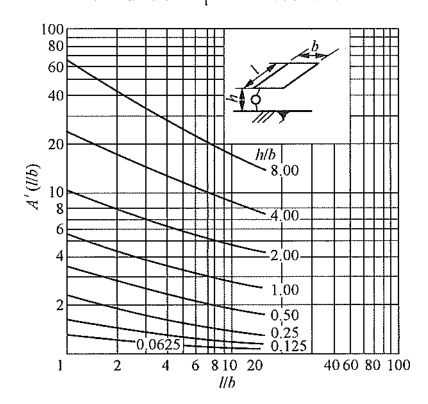


图 3-55 估算平板和金属屋顶等效面积 A' 的曲线

金属线、栅栏和檐沟：预计金属线、栅栏和檐沟的 $\dot{I}_0$ 可用图 3-56 所示的曲线。由图 3-56 看出，当长度较短时单位长度的电流就较大，这是由于端部效应的缘故。栅栏和檐沟的长度较长时，其充电电流的公式可写为

$$\dot{I}_0 = \mathrm{j}\omega Eh \frac{2\pi\varepsilon_0 L}{\ln \dfrac{2h}{GMR'}} \tag{3-191}$$

式中 GMR'——物体的静电几何平均半径，m；

L——金属线、栅栏或檐沟的长度，m。

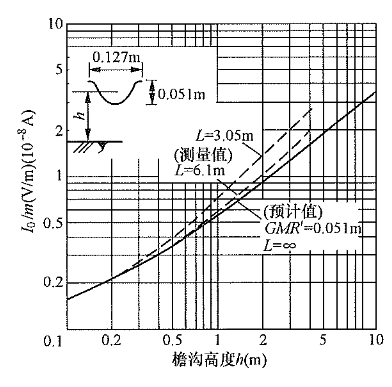


图 3-56 估算金属线、栅栏和檐沟的 I_0/m 的曲线

图 3-56 中的数据曲线采用的是真空电介质。式（3-191）对于栅栏通常是正确的，但对于檐沟并不如此。有金属檐沟的建筑物是导电的，因此实际的 $\dot{I}_0$ 比这些曲线预计的数值要小。

【例 3－4】计算以下三种情况的充电电流。

（1）计算如图 3-57 所示小汽车的电流 I_0。

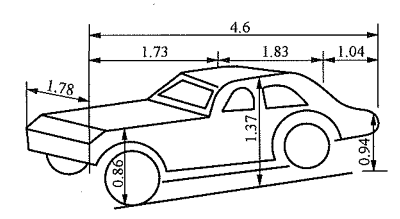


图 3-57 估计 I_0 的小汽车尺寸（单位：m）

解 由图 3-57 得

$$h=\frac{1.73\times0.86+1.83\times1.37+1.04\times0.94}{4.6}=1.08\ (\text{m})$$

$$a/b=4.6/1.78=2.58$$

由图 3-53 曲线查得 $K=5.5$，则

$$A'=5.5\times4.6\times1.08=27.3\ (\text{m}^2)$$

在无汽车时计算得地面场强 $E=9000\text{V/m}$，则 50Hz 交流的情况下充电电流 I_0 为

$$I_0=2.78\times10^{-9}\times9000\times27.3=0.682\ (\text{mA})$$

实测值 $I_0=0.665\text{mA}$。计算值与实测值相当吻合。

（2）一根金属线长 150m，高出地面 1m，在电场强度为 5kV/m 处与输电线路平行，金属线的 $GMR'=1.5\text{mm}$。

根据式（3-191），将已知数代入该式则求得充电电流 $I_0=1.82$（mA）。

（3）金属线长 120m，高出地面 1m，$d=3\text{mm}$，与多脑型排列的双回线路垂直交叉（线路每侧约 60m）。

由于不平行，应分段计算。由图 3-58 计算出每段地面出现最大电场强度相应的平均相角。分为 8 段，每段 15m，计算参数见表 3-33。

表 3-33 计 算 参 数

金属线段号	平均电场强度（kV/m）	平均相角（°）	充电电流幅值（mA）
1	0.4	140	0.014
2	0.8	125	0.025
3	2.7	100	0.10
4	2.8	－20	0.103
5	3.7	－75	0.137
6	2.4	－20	0.089
7	0.5	0	0.0183
8	0.15	30	0.006

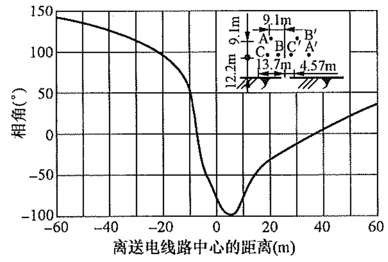


图 3-58 混合相序排列双回路的地面电场强度的相角（A 相的相角）

考虑相位后总的充电电流 I_0 约为 0.045mA，并计算得对地电容为 930pF，则线上的感应电压 $U_0=I_0/\omega C_0=154\text{V}$。

（三）电流对人和动物的影响

电流根据其性质及其产生的影响可以有不同的分类。按电流的性质，可分为稳态交流电流，暂态电流和直流电流。根据其影响，又可分为感觉不到的电流、可感觉到的电流、二级电击电流和一级电击电流。

一级电击电流可产生直接的生理伤害，并可使人和动物致死。二级电击电流虽不能产生直接的生理伤害，但却使人感到刺激和烦恼，甚至产生使人难以接受的痛感和引起不自觉的肌肉反应。

1. 稳态电流

（1）感觉电流。

人体的不同部分对电流的敏感程度各不相同，而最敏感部分是舌头。但是当电流在两手之间或手与脚之间通过时，手的知觉实际是重要的。

达尔齐尔对人的试验结果示于图 3-59（直流电流）和图 3-60（交流电流）。其数据符合正态分布，但有很大分散性（被试者比率 1%和 99%的数值之比为 1∶4），对男人的平均值为 5.2mA（直流电流）和 1.1mA（60Hz 交流电流）。对直流电流的最初感觉是热的感觉，而交流电流则给人以刺痛的感觉。

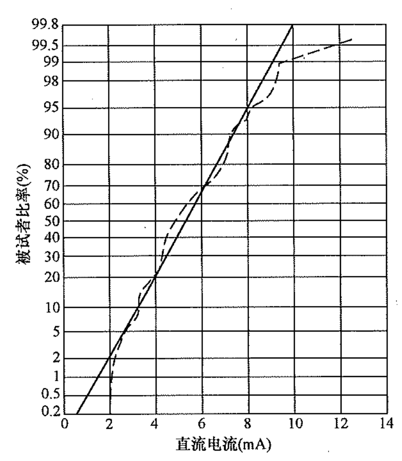


图 3-59 可感觉的最小直流电流的分布曲线（数据是从对 115 人的试验取得的）

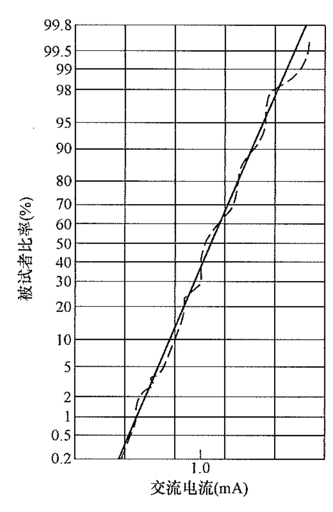


图 3-60 可感觉的最小交流电流的分布曲线
（数据来自对 167 人的试验）

频率对感觉电流的影响示于图 3-61，其频率范围为 60～200kHz。当频率超过 100kHz 时，刺痛感觉便变成热的感觉。图中曲线系指接触情况，而且是对与图 3-60 不同的所有例子而言，所以其结果应解释为频率的影响。

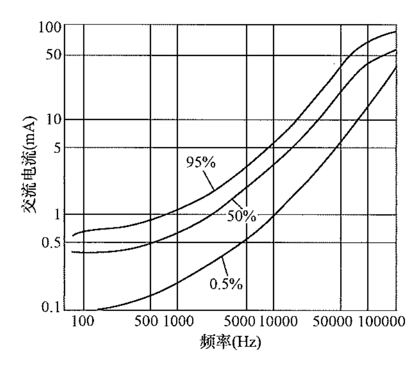


图 3-61 频率对感觉电流的影响

注：图中百分数为被试者比率。

（2）二级电击电流。

对于与超高压和特高压架空输电线路有关的大多数情况，发生直接的生理伤害的危险性很小。但是，尽可能地避免发生痛苦或使人烦恼的感觉还是很重要的。

达尔齐尔试验结果，稳态电流对人体的影响见表 3-34。

奥西普卡对 50 个健康的男子（19～22 岁）试验结果，稳态电流对人体的影响见表 3-35 和表 3－36。

表 3-34 稳态电流对人体的影响 mA

序号	对人体的影响	电流					
		直流		60Hz（有效值）		10Hz（有效值）	
		男人	女人	男人	女人	男人	女人
1	手无感觉	1	0.6	0.4	0.3	7	5
2	轻微刺痛、临界感觉（平均）	5.2	3.5	1.1	0.7	12	8
3	无疼痛的电击，肌肉未失控制	9	6	1.8	1.2	17	11
4	疼痛的电击，人的 0.5%肌肉失控制	62	41	9	6	55	37
5	疼痛的电击——摆脱极限	76	51	16.0	10.5	75	50
6	疼痛和严重的电击，肌肉收缩，呼吸困难	90	60	23	15	94	63
7	短时电击可能引起心房纤维性振颤： （1）电击持续 0.03s； （2）电击持续3s； （3）心房纤维性振颤	 1300 500 1370	 1300 500 1370	 1000 100 275	 1000 100 275	 1100 500 1375	 1100 500 1375

表 3-35 50Hz 交流电感应对人体的影响，电流通路手－躯干－手（有效值，mA）

对人体的影响	被试者的比率		
	5%	50%	95%
手表面有感觉	0.7	1.2	1.7
手表面似乎有麻痹似的连续针刺感	1.0	2.0	3.0
手关节有连续针刺感	1.5	2.5	3.5
手有轻度颤动，关节有压迫感	2.0	3.2	4.4
前肢部有受手铐压迫似的轻度痉挛	2.5	4.0	5.5
上肢部有轻度痉挛	3.2	5.2	7.2
手硬直有痉挛，但能伸开，已感到有轻度疼痛	4.2	6.2	8.2
上肢部有剧烈痉挛失去感觉，手前表面有连续刺痛感	4.3	6.6	8.9
手的筋肉直到肩部全部痉挛还可摆脱（摆脱电流）	7.0	11.0	15.0

表 3-36　50Hz 交流电感应对人体的影响，电流通路单手－躯干－两脚（有效值，mA）

对人体的影响	被试者的比率		
	5%	50%	95%
手表面有感觉	0.9	2.2	3.5
手表面有麻痹似的接续针刺感	1.8	3.4	5.0
关节有轻度压迫感，有强度连续针刺感	2.9	4.8	6.7
前肢部有压迫感	4.0	6.0	8.0
脚底下开始有连续针刺感，前肢有压迫感	5.3	7.6	10.0
手关节有轻度痉挛，手动作有困难	5.5	8.5	11.5
上肢部有连续针刺感，腕部特别是手关节有强度痉挛	6.5	9.5	12.5
肩部有强度连续针刺感，前肢部肘部硬直，但仍可摆脱	7.5	11.0	14.5
手指关节和踝、脚跟有压迫感，手大拇指完全痉挛	8.8	12.3	15.3
只有尽最大努力才可能摆脱（摆脱电流）	10.0	14.0	18.0

由上述试验资料看出，对男人产生不愉快感觉的工频稳态电流的平均值，即最小二级电击电流约为 2mA，但对妇女来说现有数据不充分。

（3）一级电击电流。

随着通过肌肉稳态电流的增加，肌肉的控制变得越来越困难。当电流增高到某一数值，便不可能释放握在手中的物体。产生这种状况的电流称为摆脱电流，一般定义为最小一级电击电流。图 3-62 所示为直流电流的摆脱值分布曲线。图 3-63 所示为工频电流的摆脱值分布曲线。如果最小摆脱值取相当于 0.5%概率的数值，则从图 3-63 可看出，对于男人，摆脱值为 9mA，女人为 6mA，儿童建议取用 5mA。

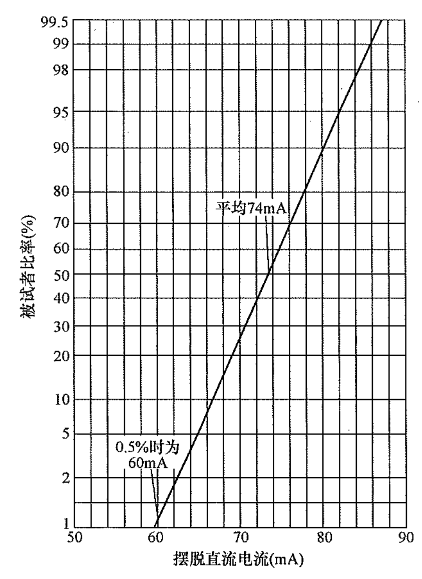


图 3-62　直流电流摆脱值的分布曲线
（数据从对 28 个男人的试验获得）

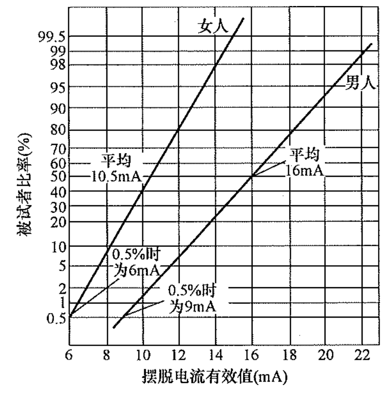


图 3-63　交流电流摆脱值的分布曲线
（数据从对 28 个女人和 134 个男人的试验获得）

频率对一级电击电流的影响如图 3-64 所示。

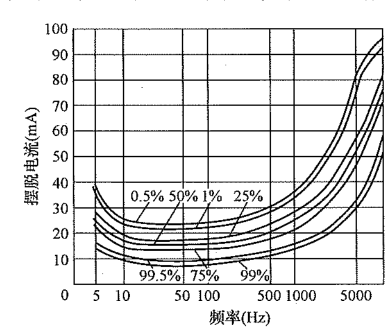


图 3-64　频率对摆脱电流的影响
（曲线表示达到摆脱状态人数的百分比）

等于或大于摆脱电流值的电流称为一级电击电流。一级电击电流可能产生心房纤维性颤动，即心房主动脉不协调的动作，它可导致血液循环停止。一旦发生纤维性颤动，实际上从来不会自然停止。影响心房纤维性颤动的参数有体重、电流幅值和电击时间。根据几种动物的试验，纤维性颤动电流实际是体重的函数，如图 3-65 所示。

达尔齐尔统计研究导出触电致死的方程如下

$$I=\frac{K}{\sqrt{t}} \tag{3-192}$$

式中　I——电流，mA；

t——电击时间，s。

用各种动物做试验，纤维性颤动概率为 0.5%时，求得 $K=165$。

2. 暂态电流

电场中的绝缘物体具有一悬浮电位，若另一个物体是接地的或电气上连接到带电设备，在稳定接触前

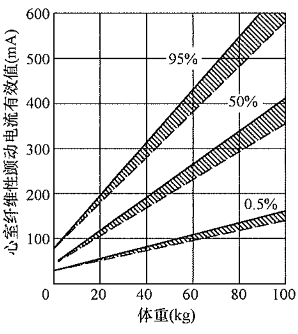


图 3-65　引起心室颤动的电流与 7 种动物（小牛、狗、羊、猫、兔、豚鼠、猪）的体重关系
实线—包括上述所有动物；虚线—不包括猪
注：图中百分数为被试者比率

的一瞬间，它们间的电位差，足以产生一个小火花。于是这个绝缘物体，通过具有一定电位的物体突然放电（或充电），即发生暂态情况，此时暂态电流比稳态时高很多。这种情况常发生在：对地绝缘（例如穿上胶靴）的人接触接地的设备；接地的人接触绝缘的设备；带电作业人员握一个有浮动电位的物体（如工具或由绝缘支持的金属部分）。上述不同情况下的暂态放电，都将有一暂态电流通过人体，产生一种不舒服的感觉，放电处的电流密度相当大（>10A/mm²）时更是如此。

火花放电时流入人体电流的大小与人体电阻有关。如果接触不良，放电可能是反复的。由于电荷的积聚（累积），两个物体之间的电压在相继发生的放电时间里是变化的。图 3-66 是表示通过人体（人接地并接触一绝缘体）的火花放电电流的概念略图。

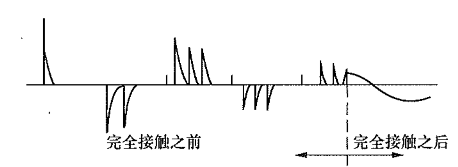


图 3-66　通过人体（该人是接地的且触及静电场中的某一绝缘体）的火花放电电流波形的概念略图

暂态放电电流，经大量测量表明总是非周期的，它的变化可用具有波前很陡的双指数脉冲恰当地表示。但在实际上用一个指数来表示已足够了，即

$$i = I_{m} e^{-t/T} \tag{3-193}$$

放电时间常数 $$T = C_0 \times \frac{R_i R}{R_i + R} \tag{3-194}$$

式中　R_i——绝缘物体固有的泄漏电阻，Ω；

R——人体的电阻，Ω；

C_0——绝缘物体的对地电容，F。

关于暂态电流对人体的影响，加拿大做了一些试验发表在 1976 年大电网会议论文中，他们在试验过程中将 200、1200、6000pF 的电容器充电到不同的电压，通过很大的电阻向人体放电。每个自愿受试者都经受同样次数放电。受试者赤脚站在接地的金属板上，用指尖轻轻接触尖端而得到电荷［图 3-67（a)，图 3-67（b)］是通过 3×17mm 的铜片得到电荷，铜片夹在两手指末端，而图 3-67（c）是铜片握在手里。每个受试者都按照可感的、轻的、可接受的、严重的四种水平来提供感应电击的感觉，并施加足够次数的电击来估计感觉。由图 3-67 看出，属于“可感的”这一类的平均水平约为 3μC。当用针尖接触时，要低于 3μC，而用手握紧铜片时，则要高于 3μC。感觉水平还依电容的不同而稍有变化，电容越小感觉越强（系指积蓄电荷相同而言）。

试验测试还表明，按感觉来评价，电荷是最理想的参数，而达尔齐尔则认为能量是理想的参数。

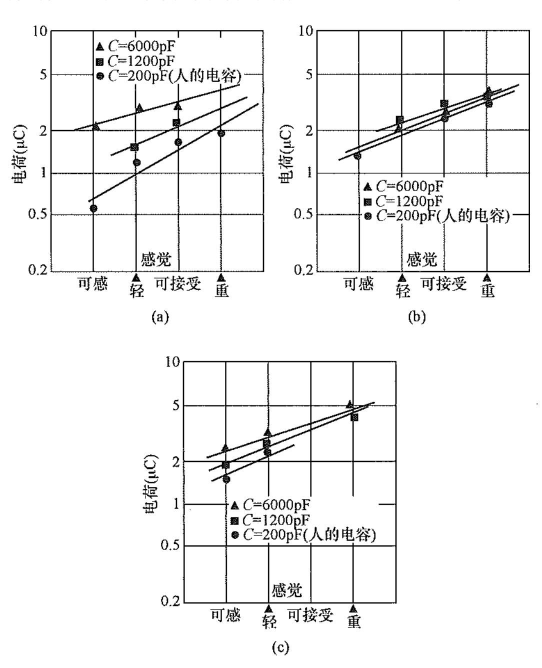


图 3-67　人对电击的感受曲线

美国 IEEE 输电线路静电效应工作组提出：当人或物体对地电容为 27.5pF，感应电压为 1000～2000V 时，会产生轻度的电击感觉；当人或物体对地电容等于或大于 275pF，充电到 2000V 或以上时，会发生疼痛的电击。美国特高压试验基地试验认为，当 C=1000pF 时，电压 U=700～1200V（能量=0.5～1.5mJ）就会产生疼痛的感觉。

暂态电流不大可能产生一级电击，因为通常很难有这样大的物体，在它对地的电容中积蓄足以产生这样电击的能量。对于非常短时间的暂态电流，应以其能量来评价其影响。根据对动物的试验数据，对人的

最小一级暂态电击可取 50J。

根据上述将电流对人影响的数据摘要列于表 3-37。

表 3-37 电流对人影响的数据摘要

电流分级	直流电流（mA）	稳态工频电流有效值（mA）	暂态电击
感觉电流： 男人 女人	 5.2 3.4	 4.1 0.8	3μC
最小二级电击电流： 男人 女人	 9 6	 1.8 1.2	约为 1.5mJ
最小一级电击电流： 男人 女人 儿童	 62 41	 9 6 5	50J

二、磁场效应

近年来，世界各国对工频磁场的生物效应进行了大量的试验研究。虽然有些问题得到了比较一致的看法，如现有输电线路下的电磁场对人体不会有明显的直接影响，但是不少问题仍在研究之中。另外，随着微电子技术不断向着高集成度、高灵敏度、低功耗方向发展，强电系统对弱电系统的干扰尤为突出。这种干扰主要是由高压输电线的静电效应和磁场效应的影响引起的。需要对输电线路附近的磁场强度给予一定限制，尽量减少工频磁场对周围环境和设备的影响。

（一）磁场强度及其计算

1. 镜像导线深度

与工频电场不同，计算工频磁场时，镜像导线位于地面以下的深度并不与实际导线的高度相等，而是由式（3-195）算得：

$$d = 660\sqrt{\frac{\rho}{f}} \tag{3-195}$$

式中 d——镜像导线深度，m；

ρ——大地电阻率，Ω·m；

f——频率，Hz。

由公式计算可得到镜像导线深度非常大。对同一观察点，镜像导线对地面上观察点的磁场强度与实际导线相比，其值很小，因此计算工频磁场时镜像导线的作用可以忽略不计。

2. 工频磁场二维计算方法

国际大电网会议工作组推荐了计算高压输电线路空间工频磁场强度的方法，在工频情况下，线路的磁场仅由电流产生，可直接应用安培环路定律分别计算每根导线电流产生的磁场，然后将计算结果叠加，得出导线周围的强度。

由安培环路定律计算导线电流在空间产生的磁场强度为

$$H = \frac{i}{2\pi r} \tag{3-196}$$

磁感应强度为

$$B = \frac{\mu i}{2\pi r} \tag{3-197}$$

式中 μ——磁导率；

r——圆的半径。

这时，模型中第 n 相导线在空间一点 p_i 产生磁感应强度 B_{ni} 大小为

$$B_{ni} = \frac{\mu I_n}{2\pi r} = \frac{\mu I_n}{2\pi\sqrt{(x_n - x_i)^2 + (y_n - y_i)^2}} \tag{3-198}$$

$$\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ \text{H/m}$$

式中 n——导线编号，$n=1，2，3\cdots$；

I_n——第 n 相导线电流。

考虑磁感应强度的方向性，式（3-198）可写为

$$\vec{B}_{ni} = \frac{\mu I_n}{2\pi r}\vec{r}_0 \tag{3-199}$$

故，x 方向和 y 方向的磁感应强度分别为

$$B_{nxi} = \frac{\mu I_n}{2\pi r}\vec{r}_x = \frac{\mu I_n}{2\pi\sqrt{(x_n - x_i)^2 + (y_n - y_i)^2}} \times \frac{y_n - y_i}{\sqrt{(x_n - x_i)^2 + (y_n - y_i)^2}} = \frac{\mu I_n (y_n - y_i)}{2\pi r^2} \tag{3-200}$$

$$B_{nyi} = \frac{\mu I_n}{2\pi r}\vec{r}_y = \frac{\mu I_n}{2\pi\sqrt{(x_n - x_i)^2 + (y_n - y_i)^2}} \times \frac{x_n - x_i}{\sqrt{(x_n - x_i)^2 + (y_n - y_i)^2}} = \frac{\mu I_n (x_n - x_i)}{2\pi r^2} \tag{3-201}$$

由叠加原理知，N 相导线在 P_i 点产生的 x 和 y 方向磁感应强度为

$$\left.\begin{aligned} B_{xi} &= \sum_{n=1}^{N} B_{nxi} \\ B_{yi} &= \sum_{n=1}^{N} B_{nyi} \end{aligned}\right\} \tag{3-202}$$

合成磁感应强度为

$$B_i = \sqrt{B_{xi}^2 + B_{yi}^2} \tag{3-203}$$

3. 工频磁场三维计算方法

前述对架空线路磁场的二维计算方法是基于输电线路无限长且平行于大地这一假设而进行的。然而实际情况是，由于电线仅能承受轴向张力而不能承受弯

曲力矩，电线上作用的荷载均指向同一方向且沿电线长度均匀分布，以致架空线路呈悬链线形状。因此为了更准确地计算架空线路下磁场值的大小，就有必要采用悬链线模型，而方法仍然采用毕奥—沙伐定律。

一根任意走向的载流导体都可以看成是由若干段直载流导线所组成，无屏蔽时，载流导体在周围任一点上产生的磁场都可以看成是这些直导线段在该点产生的磁场的矢量和。因此，只要推导出有限长任意直导线的磁场计算公式，就可根据叠加原理，采用数值计算方法计算载流导体作用下的磁场分布。

如图 3-68 所示，空间任一载流线段 RS，端点为 (x_q, y_q, z_q) 和 $(x_{q+1}, y_{q+1}, z_{q+1})$，载流 i_q。经推导，它在空间任一点 $P(x,y,z)$ 上产生的磁场

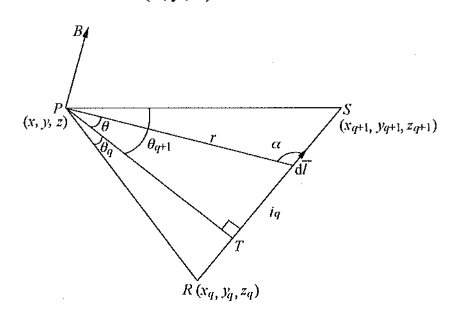


图 3-68　三维磁场计算方法示意图

$$\left.\begin{aligned} &B_q = \frac{\mu_0 i_q}{4\pi \cdot PT}(\sin\theta_q + \sin\theta_{q+1}) \\ &PT = \sqrt{PR^2 - RT^2} \\ &\sin\theta_q = RT / PR \\ &\sin\theta_{q+1} = (RS - RT) / PS \end{aligned}\right\} \tag{3-204}$$

$$\begin{aligned} RT = &\frac{x_q - x_{q+1}}{RS}(x - x_q) + \frac{y_q - y_{q+1}}{RS}(y - y_q) + \\ &\frac{z_q - z_{q+1}}{RS}(z - z_q) \end{aligned} \tag{3-205}$$

式中：$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$，为真空磁导率；$RS$、$PR$、$PS$ 是 P、R、S 三点间的距离。

B_q 在三个坐标方向上的分量为

$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{B}_{x,q} &= \frac{I}{\sqrt{I^2 + m^2 + n^2}} B \\ \boldsymbol{B}_{y,q} &= \frac{m}{\sqrt{I^2 + m^2 + n^2}} B \\ \boldsymbol{B}_{z,q} &= \frac{n}{\sqrt{I^2 + m^2 + n^2}} B \end{aligned}\right\} \tag{3-206}$$

$$\begin{cases} I = (z_q - z_{q+1})(y_{q+1} - y) - (y_q - y_{q+1})(z_{q+1} - z) \\ m = (x_q - x_{q+1})(z_{q+1} - z) - (z_q - z_{q+1})(x_{q+1} - x) \\ n = (y_q - y_{q+1})(x_{q+1} - x) - (x_q - x_{q+1})(y_{q+1} - y) \end{cases}$$

复杂的多载流导线可以看成是由多个载流导线段组成，根据叠加定理，导线周围任一观测点上的磁场是每段导线在该点磁场矢量和。对于有 N 个所载电流各不相同的导线，其周围任一观测点上的磁场在各坐标方向上的分量为：

$$\begin{cases} B_x = \sum_{i=1}^{N} B_{x,i}\cos\varphi_i + \mathrm{j}\sum_{i=1}^{N} B_{x,i}\sin\varphi_i \\ B_y = \sum_{i=1}^{N} B_{y,i}\cos\varphi_i + \mathrm{j}\sum_{i=1}^{N} B_{y,i}\sin\varphi_i \\ B_z = \sum_{i=1}^{N} B_{z,i}\cos\varphi_i + \mathrm{j}\sum_{i=1}^{N} B_{z,i}\sin\varphi_i \end{cases} \tag{3-207}$$

式中：$B_{x,i}$、$B_{y,i}$、$B_{z,i}$ 分别是第 i 根载流为 I_i 的导线在该点产生的磁场在 x、y 和 z 轴方向上的分量；φ_i 为第 i 根导线所载电流 I_i 的相位角。

显然，在该观测点上的合成总磁场为

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \tag{3-208}$$

（二）工频磁场的分布

当输电线路的导线中有电流通过时，就会在周围产生磁场。磁场具有一些与电场不同的特性：①磁场强度的大小只与电流有关，而与电压无关；②50Hz 的工频磁场很容易穿透大多数物体（如建筑物和人），且不会受到这些物体存在的干扰。

交流输电线路的三相电流大小相等，相位互差 120°，因而在离开导线较远的地方，一般可以认为三相电流产生的磁场相互抵消为零，即使在输电线路附近的磁场也是很弱的。但是，500～1000kV 输电线路为了提高导线的电气绝缘性能，加大了线间距离，这样在距输电线路 200～300m 的地方，三相导线就不能再看成一个点了，在输电线路附近的磁场强度也明显增加了。

图 3-69 为美国 BPA（邦维尔电力管理局）输电线路的地面磁场强度计算曲线。500kV 输电线路下的最大地面磁场强度仅为 0.035mT，在我们日常生活中，彩色电视机或电炊具附近的磁场强度约为 0.5～1.0mT。与之相比，工频磁场强度要小 1～2 个数量级，所以，输电线路所产生的磁场是比较弱的。

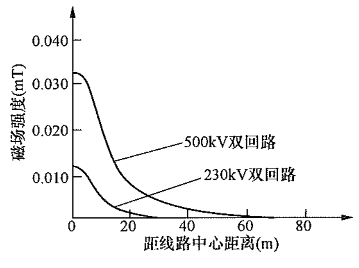


图 3-69　美国 BPA 输电线路的地面磁场强度计算曲线

从图3-70可以看出我国各电压等级输电线路在额定输送功率的情况下地面磁场强度 1000kV 线路最大值也只有 25μT 最大，这一量级远小于 GB 8702—2014《电磁环境控制限值》公共暴露限值 0.1mT 的要求。

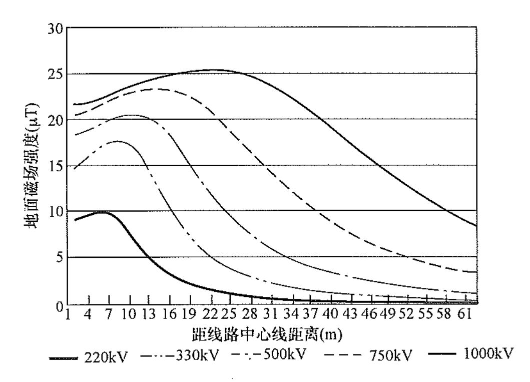


图 3-70 我国各电压等级线路额定输送容量条件下的地面磁场强度（μT）

在三相和多相输电线下，空间场强矢量的旋转轨迹为一椭圆，它随着空间位置的变化而变化，磁场强度的最大值（椭圆长轴）及其相位也随之而变化。在某个空间高度下，无论导线如何分布，磁场横向分布的极大值总是出现在导线档距中央附近。

（三）工频磁场的影响因素

输电线下方空间磁场的大小除了与线路负荷电流大小有关外，还和导线的布置形式、几何位置等有关。

1. 线路负荷电流的影响

由毕奥—沙伐定律可以看出，一般线路电压等级越高，负荷电流越大，因而线路下方工频磁场越大。电流的变化正比于磁场强度的变化，可以根据这种比例关系推导出任意大小的负荷电流导线附近的空间工频磁场强度。

2. 相导线对地高度的影响

在输电线路下方，工频磁感应强度随导线对地高度的增加而减小。利用这一关系，可以通过抬高导线对地高度来减小地面磁场强度。导线对地距离不大时，增加导线对地距离，磁感应强度减小的很显著；随着导线对地距离的增加，磁感应强度减小程度逐渐缓慢。

3. 相间距离的影响

减小相间距离时，最大场强值和高场强覆盖范围都相应减小，但场强的减小程度没有增加线路对地距离的效果明显。

4. 双回路相序布置的影响

同塔双回输电线路在不同相序设置下，磁感应强度的分布规律有所不同。逆相序布置时，磁感应强度最小；同相序布置时，磁感应强度最大；其余相序布置时磁场分布差别不大。相序布置对双回输电线路的磁场分布影响并不大，与单回线路相比，采用双回线路本身就大大降低了线路下方的磁场。这是由于双回线路相导线是上下排列的，这样每相中的电流在地面产生的磁场可以部分抵消，从而降低地面磁场。

5. 导线排列方式的影响

500kV 单回路导线排列方式有水平排列、垂直排列、正三角排列和倒三角排列。其中水平排列时高磁场区的覆盖范围最大，垂直排列时磁场横向分布的极值最大，倒三角排列时的极值和高场强覆盖范围均最小。

（四）磁场的影响

工频磁场效应可归纳为接触到有感应电压的物体而引起的电击和由感应的人体电压、电场和电流引起的可能的长期生态效应。

1. 短时影响

工频磁场的短时影响主要表现在接触到由磁感应电流产生了电压的物体而引起的电击。磁场能在一根长导体两端感应电压。通常，这些导体的一端是接地的，大地构成了环路的其余部分，接通这个回路的人或动物因而将感受到稳态的或暂态的电击。感应电流和摆脱电流与电场耦合感应电流时的情况一样。与电场感应情况相比，磁感应电压通常较低，而磁感应电流较高。对于输电线路附近的物体（金属体），采取切断其电气连续通路、适当接地等措施，可以防止电击。

2. 长期影响

交变磁场能够在生物体内部感应产生电场和电流。但是，这些电场和电流比由输电线路的电场产生的内部场和电流更弱。如 0.1mT 的工频磁场在人体内感应的电流密度，在数量上近似于由 2.5kV/m 电场产生的电流密度。

关于磁场影响，WHO 指出：“在家庭或日常环境中所遇到的磁场水平下，没有经确认的实验室证据表明极低频磁场会影响人体的生理与行为；志愿者在强度高达 5mT 的极低频场中曝露数小时后，其临床与生理指标（包括血液变化、心电图、心率、血压和体温）几乎看不到影响”。

三、电磁效应控制限值标准

（一）电场的标准

超高压输电线路设计必须避免因静电感应造成人身危险，但要设计成一个对人完全没有静电感觉的输电线路是不经济的。设计的基本原则是：当人们遭受到静电电击时不应有人身危险，而其感觉是人们可以接受的。

从前面分析看出，地面上通常很难有不接地的庞大物，其积蓄的能量足以给人以致命的电击，因此设计线路时可不必考虑暂态电击。需要考虑的是电场强度和稳态电流对人的影响问题。各个国家设计超高压

输电线路时对静电感应的考虑和处理是不同的，如美国能源部颁发的《超高压特高压架空输电线路电气与机械设计规范（1980DOE/ RA 12133－10）》中认为静电场强的控制取决于当前生态研究的结果。交流线路线下面的地面上 1m 处的电场强度规定采用 7.5～15kV/m，走廊边缘处的场强规定为 1～4kV/m。

日本设计 500kV 线路时采用地面场强不超过 3kV/m，对大型汽车静电感应短路电流不超过 2mA。

苏联 1983 年出版的《超高压输电设计机械部分》一书中要求，地面静电场强不超过 5kV/m，通过居民区的地面场强应不超过 0.5kV/m。并且规定 750kV 及以上电压线路跨越道路时路基上的场强不应大于 10kV/m，跨越公路时交叉处两侧的保护区域内禁止运输车辆停车。

我国第一批 500kV 线路设计，控制地面静电场强小于 9kV/m，线下大型车辆感应的短路电流不超过 5mA。住人的房屋处所之地面场强不大于 4kV/m。对 500kV 线路交越电力线、通信线和索道等的静电感应影响也做了考虑。

需要指出，线下大型车辆感应的短路电流与地面的静电感应强度成正比例。因此对静电效应来说控制地面场强是十分重要的，然而有许多输电线路的参数影响着场强，如导线对地距离、分裂导线的根数和其等价半径、相导线间的距离和排列方式以及相序排列等。随着导线对地距离增大地面场强减小；导线为三角排列比水平排列的场强小；场强随相导线间距离减小而减小；场强随分裂导线根数的减少而减小；双回路线路逆相序排列的场强最小。所有这些，要求线路设计人员充分考虑各个参数的影响，经过全面分析后才能做出技术经济合理的决策。

此外，降低地面静电场强也可采用屏蔽线（或网）等屏蔽措施。一般说来采用屏蔽办法控制场强是不经济的。但是对于个别场合，如线路通过居民区附近，为了减少房屋拆迁采用屏蔽方法来控制场强可能是经济合理的，也是最可行的。

（二）工频磁场的标准

1. 国际标准

世界卫生组织国际电磁场计划把电磁场标准分为两类：① 曝露标准，按科学依据限制针对人体的电磁场曝露（ICNIRP 导则与 IEEE 标准即属此类）；② 限制排放水平的技术标准，规定用以限制设备产生电磁场水平的控制性限值。ICNIRP 导则纯属曝露标准，只针对公众赋予了比对职业人员更大的安全因子；而 IEEE 标准则在提出曝露限值的同时，还针对输电线路走廊等特定环境提出了有关设备许可排放的电磁场限值，故 IEEE 标准同时又起技术标准的作用。显然，曝露标准是判定是否存在健康危害的依据。

WHO 国际电磁场计划明确推荐，作为形成全球标准基础的曝露限值有以下两项：

（1）1998 年国际非电离辐射防护委员会发布的《限制时变电场、磁场和电磁场曝露（300GHz 以下）导则》；

（2）2002 年 9 月 22 日，美国 IEEE 批准发布的《IEEE 关于人体曝露于 0～3kHz 电磁场的安全水平标准（IEEE std. C95.6—2002）》。

上述两项曝露标准，对人体曝露于工频磁场环境中磁场强度的允许限值做出规定，见表 3-38。

表 3-38　工频磁场限值对照表

标准		磁感应强度（μT）	
		职业/受控环境	公众
ICNIRP	50Hz	500	100
	60Hz	416.6	83.3
IEEE C95.6—2002		2710	904

2. 各国家及组织的标准

表 3-39 列出了各先进工业国家或组织对工频磁场公众及职业曝露的控制限值。由表 3－39 可看出，各国际组织制订的曝露与控制标准的限值，均无例外的比 ICNIRP 导则规定的允许曝露限值更为宽松。这一事实充分说明，国际权威组织一致性地认定 ICNIRP 导则推荐的公众居住环境允许曝露限值（磁感应强度 100μT）以及受控环境中的曝露限值（500μT）是足够安全的。

表 3-39　各国家及组织的工频磁场标准

标准名称	磁感应强度（μT）	
	职业曝露	公众曝露
欧洲共同体法规（1999/519/EC）50Hz	—	100
欧洲标准化委员会（CENELEC 1995）60Hz	1333	533
英国国家辐射防护委员会（1993）50Hz	1600	1600
美国政府工业卫生联合会（ACGIH 1998）60Hz	1000	—
苏联（1975）50Hz	1760	—
日本产业卫生学会标准（2002）50Hz	1000	—
澳大利亚（ARPANSA）标准（2006）0～3kHz	500	100

我国环境行业标准 HJ/T 24—1998《500kV 超高压送变电工程电磁辐射环境影响评价技术规范》推荐以

ICNIRP 关于对公众照射的限值 0.1mT 作为磁感应强度的评价标准。

第八节 绝缘配合设计

一、线路绝缘配合设计的原则

（一）线路绝缘配合设计的概述

架空输电线路的绝缘配合设计是要解决杆塔上和档距中各种可能放电途径（包括导线对杆塔、导线对地线、导线对地、不同相导线间）的绝缘选择和相互配合的问题，其具体内容为：

（1）杆塔上的绝缘配合设计就是按正常运行电压（工频电压）、内过电压（操作过电压）及外过电压（雷电过电压）确定绝缘子型式及片数以及在相应风速条件下导线对杆塔的空气间隙距离。

（2）档距中央导线及地线间的绝缘配合设计就是按外过电压（雷电过电压）确定档距中央导线与地线间的空气间隙距离。

（3）档距中央导线对地及对各被跨越物的绝缘配合设计就是根据内过电压（操作过电压）及外过电压（雷电过电压）的要求，确定导线对地及对各被跨越物的最小允许间隙距离。

对超高压及特高压线路，除按此项要求考虑对地最小允许间隙距离外，尚应满足地面静电场强影响所需对地最小允许间隙距离的要求。

（4）档距中央不同相导线间的绝缘配合设计，即按正常运行（工频）电压并计及导线振荡的情况，确定不同相导线间的最小距离。

（二）线路绝缘配合设计的方法

为确定电气设备（包括线路杆塔的塔头等）绝缘水平而进行的操作及雷电过电压绝缘配合的设计方法如下：

（1）惯用法。对于自恢复绝缘和非自恢复绝缘均可采用惯用法进行绝缘配合设计。这种方法首先是确定电气设备绝缘上可能出现的最大过电压，然后根据经验乘上一个裕度系数，这样就确定了绝缘的最低耐压强度，其情况如图 3-71 所示。

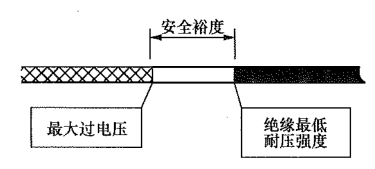


图 3-71 绝缘配合的惯用法

由于过电压和绝缘强度都是随机变量，所谓最大过电压和绝缘最低耐压强度并非绝对最大和最低，实际上只可能是和某一足够小的概率相对应而已。而根据经验所乘的裕度系数，不是建立在概率统计的基础上，而是带有一定的任意性，特别是对超高压以上电网来讲，在经济上是不能允许的。另外，随着电网电压等级的不断提高，操作过电压将成为确定线路绝缘的控制因素，而空气间隙和绝缘子串的操作冲击放电电压的分散性非常大，波形的影响也很大，这就给在绝缘配合中应用惯用法造成了困难。因此，对超高压以上线路，目前已开始采用绝缘配合的统计法或简化统计法。对于非自恢复绝缘的设备（如变压器、电抗器等），不可能通过绝缘试验来确定统计的耐压点，亦不可能将破坏概率作为定量设计参数，故对此类设备仍有必要考虑使用惯用法。

（2）统计法。统计法的特点在于承认存在绝缘击穿这一事实，允许对自恢复绝缘有一定的故障率，并按可以接受的故障率来选择绝缘。

统计法的根据是假定描述过电压和绝缘强度随机特性的概率函数是已知的。当知道了过电压概率密度函数 $f(u)$ 和绝缘的放电概率函数 $P(u)$，就可以计算由过电压引起的绝缘损坏的危险性。如图 3-72 所示，$f(U_0)\mathrm{d}u$ 为过电压在 U_0 附近 du 范围内出现的概率，$P(U_0)$ 为在过电压 U_0 作用下绝缘击穿的概率，则出现这样高的过电压并损坏绝缘的概率为 $P(U_0)f(U_0)\mathrm{d}u$，即图 3-72 中密阴影部分面积。把 $P(u)f(u)$ 函数积分即为绝缘在过电压作用下的故障（损坏）率。

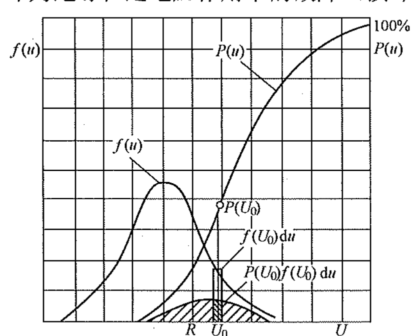


图 3-72 绝缘故障率统计计算图

$P(u)$—绝缘放电概率；R—绝缘故障率；

$f(u)$—过电压概率密度

$$R=\text{总阴影面积}=\int_0^{\infty}P(u)f(u)\mathrm{d}u$$

根据允许的绝缘故障（损坏）率 R，即可确定设备应具有的绝缘水平。

（3）简化统计法。统计法的计算是很复杂的。假如过电压和绝缘耐受电压的统计分布的图形为已知（如假定它们为正态分布），就可以采用简化统计法。

简化统计法就是用对应某一定参考概率的点来代替整条概率曲线。如 GB 311.1—2012《绝缘配合 第 1 部分 定义、原则和规则》取参考概率为 2%的过电压作为统计过电压（U_0），取耐受概率为 90%（相当于

10%的放电概率）的电压作为绝缘的统计冲击耐受电压（U_r），用这两个电压值分别代替惯用法中的最大过电压和绝缘最低耐压强度，并在这两个电压值间选择一个由统计安全系数（γ）表征的裕度。故障率就与这两个电压值之间的裕度相关。根据这个关系，按给定的故障率，就可以确定设备的绝缘水平。其情况如图3-73所示。

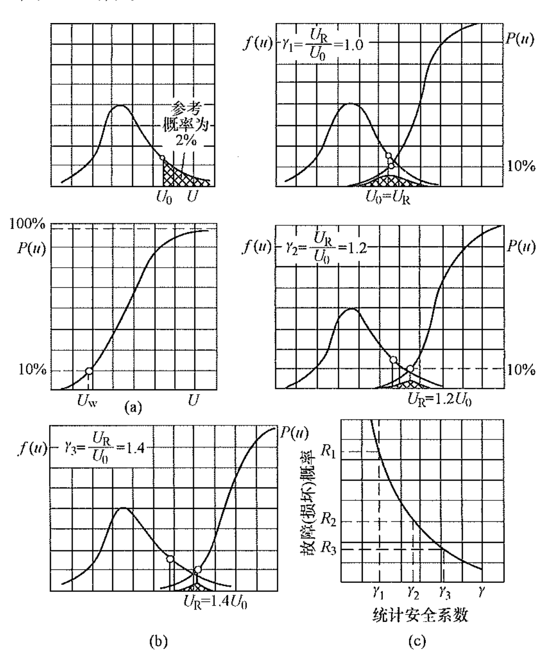


图3-73 简化统计法示例图

（三）绝缘配合设计的原则

线路的绝缘配合主要是塔头的绝缘配合和线路档距中央的绝缘配合。本部分主要给出塔头的绝缘配合，档距中央的绝缘配合见本章第七部分。

绝缘由绝缘子串及空气间隙组成，其选择原则如下。

1. 绝缘子串的选择

（1）在正常运行（工频）电压作用下，绝缘子应有足够的机电破坏强度。也就是说，应按线路运行电压、绝缘子的机械强度（如机械或机电破坏荷载）及拟承受的外荷载（如导线荷载），并考虑一定的安全系数来选择绝缘子的型式。

（2）在正常运行（工频）电压作用下，绝缘子应具有足够的电气绝缘强度。这是因为在正常工频电压作用下，特别是在绝缘子表面积有一定的污秽时，有可能沿绝缘子串表面发生闪络。为了防止这类故障所需的电气绝缘强度，通常以绝缘子串的爬电比距（亦称单位泄漏距离，cm/kV）来表示。根据所要求的爬电比距，并根据所选绝缘子单片爬电距离数值即可确定所需绝缘子片数。若有可能，亦可利用绝缘子串的成串污闪特性来选择。

（3）绝缘子串还应能耐受内过电压（操作过电压）的作用，即绝缘子片数的选择尚应满足操作过电压的要求。

（4）一般不按外过电压（雷电过电压）的要求来选择绝缘子串的绝缘强度，而是根据已选定的绝缘水平（即按工频电压及操作过电压所确定的绝缘子型式及片数）来估计线路的耐雷性能。仅在个别高塔、大跨越，需要提高耐雷水平的情况下或个别高接地电阻杆塔上，才适当考虑耐受雷电过电压的需要，酌量增加绝缘子片数。

耐张绝缘子串，由于其承受的机械应力比悬垂绝缘子串大，出现零值绝缘子的概率比悬垂绝缘子串高且检修困难，因此，其电气强度应略高于悬垂绝缘子串，可按如下原则考虑：

（1）当耐张绝缘子串所用的绝缘子型式与悬垂绝缘子串的绝缘子型式相同时，根据GB 50061—2010《66kV及以下架空电力线路设计规范》、GB 50545—2010《110kV～750kV架空输电线路设计技术规范》及GB 50665—2011《1000kV架空输电线路设计规范》规定。对35～330kV输电线路耐张绝缘子串的绝缘子数量应增加一片，对500kV输电应增加2片，对750kV和1000kV输电线路不需增加片数。通过污秽地区的输电线路，由于直线高杆塔而增加绝缘子片数，并达到上述要求时，耐张绝缘子串的片数可不再比悬垂绝缘子串增加，同一污区，其爬电比距根据运行经验较悬垂绝缘子串可适当减少。

（2）当耐张绝缘子串所用的绝缘子型式与悬垂绝缘子串不同时，其整串的机电性能应不低于第（1）条中对耐张绝缘子串的要求。

2. 空气间隙及相应气象条件的选择

（1）塔头空气间隙选择的一般原则，是考虑绝缘子串风偏后，带电体与塔构间的空气间隙在正常运行（工频）电压情况下，应能耐受住最高运行电压及在一定概率条件下可能出现的工频过电压的作用；在操作过电压情况下，应能耐受住在一定概率条件下系统可能出现的操作过电压的作用；在雷电过电压情况下，对非污秽区而言，其耐压强度应与绝缘子串的耐压强度相匹配。绝缘子串在各种电压情况下的风偏取决于相应的风速取值，而风速取值则与风速的统计分布、各种电压出现的概率及其作用时间的长短等因素有关。由于工频电压长期作用在导线上各种风速均能遇上，因此，按运行（工频）电压选择空气间隙时，其计算绝缘子风偏所用的计算风速选用线路的最大设计风速。对操作过电压，由于其持续时间较短，很高的过电压和大风凑在一起发生的概率很小，结合GB 50545—2010及GB 50061—2010规定，其计算风速选

用基本风速折算到导线平均高度处的风速的 50%，但不宜应低于 15m/s。国外也有取 30%～40%风速作为操作过电压绝缘配合的风速。至于雷电过电压，其持续时间极短并发生在一定季节内，结合 GB 50545—2010 及 GB 50061—2010 规定，一般地区计算风速取 10m/s，当基本风速折算到导线平均高度处其值大于或等于 35m/s 时宜取 15m/s。

（2）对需要考虑带电作业的杆塔，尚需要考虑带电作业所需的安全空气间隙距离。由于带电作业的方式是灵活、多样的，因此，在一般情况下不应因考虑带电作业而增大塔头尺寸。

根据 DL 409—1991《电业安全工作规程（电力线路部分）》规定，带电作业应在天气良好条件下进行。带电作业时的风速一般不应大于五级（8～10.7m/s），因此，GB 50545—2010 及 GB 50061—2010 规定，检验带电作业间隙时的计算风速采用 10m/s。

二、高海拔地区外绝缘的修正

塔头绝缘选择取决于外绝缘（空气间隙和绝缘子串）的放电电压，它和大气状态（气压、温度、湿度）有关，这主要是由于空气密度和绝对湿度对外绝缘放电电压的影响所致。绝缘强度随温度和绝对湿度增加而增加，随空气密度减小而降低。湿度和周围温度的变化对外绝缘强度的影响通常会相互抵消，因此对绝缘配合，确定外绝缘放电电压时，仅对空气压力（空气密度）的影响进行修正。

由于大气状态对外绝缘放电电压有影响，为了测试数据统一起见，各国均规定了标准大气状态，并规定了大气状态不同时外绝缘放电电压相互换算的方法。当线路设计需运用各试验数据（或曲线）时，均应根据线路对绝缘的要求及线路所处地区的大气条件确定外绝缘放电电压数值，将其换算到标准大气状态下的数值，然后再查各试验所得标准大气条件下的数据（或曲线）。

各国对标准大气条件规定不尽一致。国际电工委员会（IEC）、我国、欧洲、日本等规定的标准大气条件是：

气温：20℃；

气压：1.013×10^5Pa；

湿度：11g/m³。

美国、加拿大等国规定的标准大气条件是：

气温：25℃；

气压：1.013×10^5Pa；

绝对湿度：15g/m³（气压 2026Pa）。

绝对湿度除用水分含量（g/m³）表示外，还可用水蒸气分压力（Pa）表示。水分含量 1g/m³≈135Pa。

根据 GB 50545—2010，高海拔地区污秽绝缘子的闪络电压随着海拔升高或气压降低而变化，悬垂绝缘子串的片数宜按式（3-209）进行修正。

$$n_H = ne^{m_1(H-1000)/8150} \tag{3-209}$$

式中 n_H——高海拔地区每串绝缘子所需片数；

H——海拔，m；

m_1——特征指数，它反映气压对于污闪电压的影响程度，由试验确定。

实际经验表明（参见 IEC 60721－2－3），气压随海拔呈指数下降，因此外绝缘电气强度呈指数下降。GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》规定，当大气状态不同时，外绝缘的放电电压换算海拔修正系数 K_a 可按式（3-210）确定。操作过电压海拔修正因子可按海拔修正因子 m 与电压的关系（见图 3-74）中的曲线 a、c 取值。

$$K_a = e^{mH/8150} \tag{3-210}$$

式中 H——海拔，m，$H\leqslant4000$m；

m——海拔修正因子，工频电压、雷电过电压海拔修正因子 $m=1.0$。

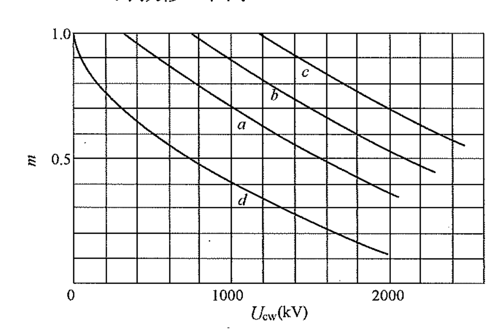


图 3-74 海拔修正因子 m

a—相对地绝缘曲线；b—纵向绝缘曲线；

c—相间绝缘曲线；d—棒—板间隙曲线

注：对于由两个分量组成的电压，电压值是各分量之和。

（见 GB/T 50064—2014 附录 A）

三、工频电压绝缘设计

（一）悬式绝缘子的机械强度

1. 悬式绝缘子机械强度的选择

绝缘子机械强度的安全系数，不应小于表 3-40 所列数值。双联及以上的多联绝缘子串应验算断一联后的机械强度，其荷载及安全系数按断联情况考虑。

表 3-40 绝缘子机械机电强度安全系数

情况	最大使用荷载		验算	断线	断联	常年荷载
	盘型绝缘子	棒型绝缘子				
安全系数	2.7	3.0	1.5（1.8）	1.8	1.5	4.0

注 验算条件的安全系数 750kV 及以下取 1.5，1000kV 取 1.8。

绝缘子机械强度的安全系数 K_I 应按式（3-211）计算，即

$$K_I = \frac{T_R}{T} \tag{3-211}$$

式中 T_R——绝缘子的额定机械破坏负荷，瓷绝缘子为额定机电破坏荷载，kN；

T——分别取绝缘子承受的最大使用荷载、断线、断联、验算荷载或常年荷载，kN。

常年荷载是指年平均气温条件下绝缘子所承受的荷载。验算荷载是验算条件下绝缘子所承受的荷载。断线的气象条件是无风、有冰、−5°C。断联的气象条件是无风、无冰、−5°C。导地线张力可按有关设计规范选取。

绝缘子所承受的荷载包括绝缘子所承受的全部最大的水平和垂直荷载组合，而且应按承受荷载最大的靠近横担处的第一片绝缘子来考虑。因为，靠横担的第一片绝缘子除承受导线的水平和垂直荷载外，还要承受其他各片绝缘子的水平和垂直荷载。

2. 悬式绝缘子串的可靠性

悬式绝缘子串（包括悬垂绝缘子串及耐张绝缘子串）一般由 m 片绝缘子相互串联组装而成；只有每片绝缘子都能可靠运行，整串绝缘子才能可靠运行；只要其中有一片断掉，整串绝缘子就会产生故障。因此，整串绝缘子的可靠性与串中每片绝缘子的可靠性有关。根据可靠性理论，并假定单片绝缘子的可靠度均相等且为 R_i，则 m 片绝缘子相互串联后，整串绝缘子的可靠度 R_1 为

$$R_1 = R_i^m \tag{3-212}$$

若采用双联绝缘子串（即两个单串并联），令每串绝缘子的可靠度为 R_1，并假定当一串绝缘子断裂（失效）后，另一串绝缘子仍能继续工作，则其可靠度 R_2 为

$$R_2 = 2R_1 - R_1^2 \tag{3-213}$$

式中 R_1——一串绝缘子的可靠度，可按式（3-212）计算。

在超高压以上输电线路上，特别对耐张绝缘子串，设计者有时需要考虑三联、四联乃至更多联绝缘子串组合的方案进行比较，此时，其可靠度可按如下公式进行计算。

设有 n 串绝缘子并联组成 n 联绝缘子串，若允许其中有 r 串绝缘子断裂，则可按式（3-214）将前 $r+1$ 项加起来计算 n 联绝缘子串的可靠度 R_n。

$$R_n = R_1^n + nR_1^{n-1}\overline{R_1} + \frac{n(n-1)}{2} \times R_1^{n-2}\overline{R_1^2} + \cdots + \frac{n!}{r!(n-r)!}R_1^{n-r}\overline{R_1^r} \tag{3-214}$$

式中 R_1——一串绝缘子的可靠度，可按式（3-212）计算；

$\overline{R_1}$——一串绝缘子的失效（断裂）概率，$\overline{R_1} = (1-R_1)$。

（二）小盘径悬式绝缘子串的工频湿闪络特性

电压较低的线路，当缺乏绝缘子串的操作过电压正极性湿闪络特性数据时，可用其工频湿闪络电压数据作为计算依据来选择绝缘子片数。有关悬垂绝缘子串的工频闪络电压试验曲线，如图3-76～图3-80所示。这些试验数据是我国早期试验数据，但至今仍可用于工程设计中。

试验表明，绝缘子串的工频干闪络电压主要与串长有关，而和绝缘子的型式关系不大，即闪络一般沿最短路径发生。此外，悬垂绝缘子串的工频干闪电压还与悬挂位置有关，即存有邻近效应。

悬垂绝缘子串的工频湿闪络电压与绝缘子型式有关，主要取决于湿闪络距离的空气间隙部分长度 L_a 和潮湿表面部分长度 L_h，特别是 L_a，如图3-75所示，$L_F = \overset{\frown}{DE} + \overline{EF} + \overline{FG} \approx nH; L_a = n\overline{BC}$； $L_h = n\overset{\frown}{AB}$ 。《电机工程分册 第27篇 绝缘子》（机械工业出版社，1978年版）建议，对标准盘形悬垂绝缘子串的工频湿闪电压 U_s 可按式（3-215）估算。

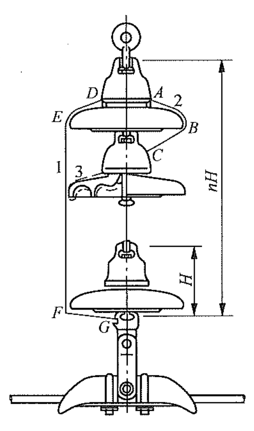


图3-75 悬垂绝缘子串的闪络距离和闪络路径

n—绝缘子片数；

1、2、3—闪络路径

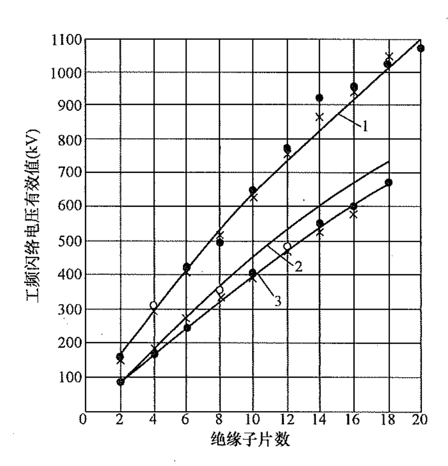


图 3-76　X－4.5、X－4.5C 绝缘子工频闪络电压曲线

1—干闪络；2—X－4.5 湿闪络；3—X－4.5C、X－1－4.5 湿闪络；●—X－4.5（146×254mm，亦称 C－105、XQ－4.5）数据；×—X－4.5C（150×254mm，亦称 C－108、C－5、XC－4.5）数据；○—X－1－4.5（170×270mm，亦称 п－4.5，пп－4.5）数据

本曲线摘自 1958 年沈阳变压器厂所做试验的数据，数据已校正到标准状态。

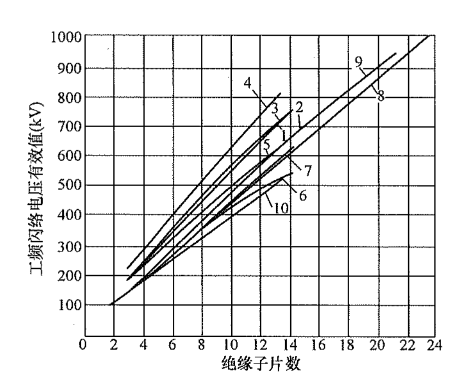


图 3-77　X－4.5、X－7 绝缘子工频闪络电压曲线

1、6—醴陵 X－7（140×250mm）干、湿闪络；
2、7—玻璃绝缘子 LX－7（146×254mm）干、湿闪络；
3、8—西瓷 X－7（150×265mm）干、湿闪络；
4、9—西瓷 X－7（170×280mm）干、湿闪络；
5—西瓷 X－4.5（146×250mm）干闪络；
10—玻璃绝缘子 LX－4.5（140×254mm）

注：湿闪络曲线 1～9 摘自 1967 年 2 月原第一机械工业部高压电器研究所《330kV 输电线及变电所绝缘试验报告》，数据已按 GB 311－64 校正到标准状态。曲线 10 摘自南京电瓷厂及南京电瓷研究所资料。

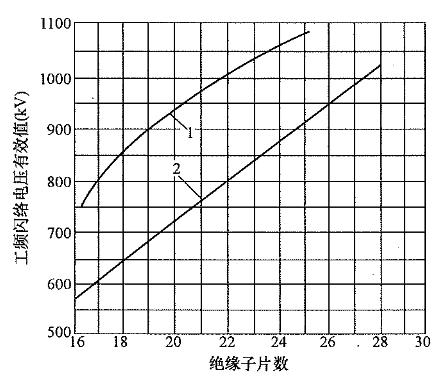


图 3-78　XP－10 绝缘子工频闪络电压曲线

1—干闪络；2—湿闪络

注：图 3-78 所示曲线摘自原第一机械工业部高压电器研究所 1984 年 2 月试验报告，试验时绝缘子串上端离横担 0.8m，下端带 P1－330 屏蔽环及分裂间距为 0.4m 的两根钢管（长 6m）。

图 3-78 所示曲线已按 IEC 60－2－73 校正到标准状态

$$U_s = 2.76L_a + E_h L_h \tag{3-215}$$

式中　L_a——单位为 cm，范围为 25～220cm；

L_h——单位为 cm，范围为 30～270cm；

E_h——湿闪部分闪络强度，kV/cm。当 L_h>200cm 时，可按 $E_h = 2.4L_h^{-0.111}$ 计算。

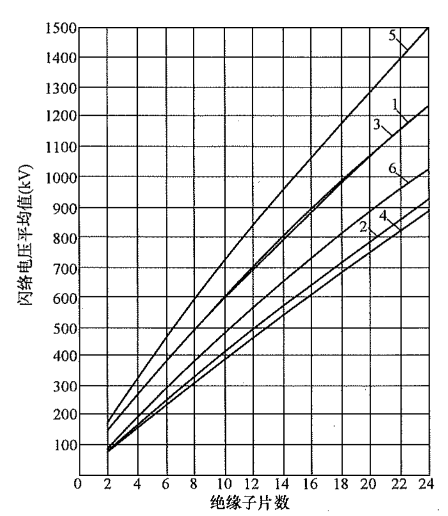


图 3-79　绝缘子工频闪络电压（平均值）曲线

1、2—10″×$5\frac{3}{4}$″（高 146mm，盘径 254mm）绝缘子干、湿闪络；3、4—11″×$6\frac{1}{8}$″（高 156mm，盘径 280mm）绝缘子干、湿闪络；5、6—$12\frac{5}{8}$″×$7\frac{3}{4}$″（高 197mm，盘径 320mm）绝缘子干、湿闪络

试验结果表明，悬垂绝缘子串和耐张绝缘子串的干闪络电压没有明显差别，而耐张绝缘子串的湿闪络电压则比悬垂串约高 2%～5%。

（三）悬式绝缘子串的工频污闪特性

1. 污秽绝缘子的运行特性

线路绝缘子，特别是在工业区、海岸和盐碱地区线路运行的绝缘子，常常会受到工业污秽或自然界盐碱、飞尘等的污染，在其表面上形成一定的污秽层。在干燥情况下，这种污秽层的电阻很大，对运行没有危险，但当遇到潮湿气候条件时，污秽层被湿润，就可能发生污秽闪络（简称污闪）。绝缘子工频最小闪络电压曲线如图 3-80 所示。

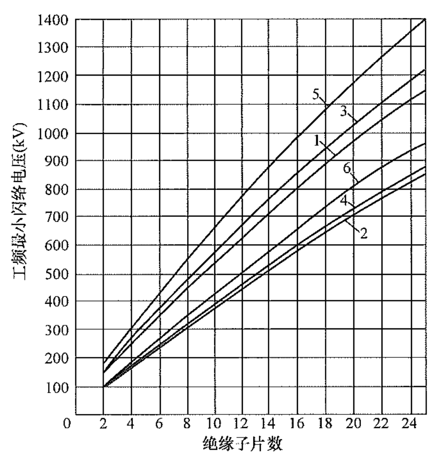


图 3-80　绝缘子工频最小闪络电压曲线

1、2—10″× $5\frac{3}{4}$″（高 146mm，盘径 254mm）绝缘子干、湿闪络；

3、4—11″× $6\frac{3}{4}$″（高 170mm，盘径 280mm）绝缘子干、湿闪络；

5、6—$12\frac{5}{8}$″ × $7\frac{3}{4}$（高 197mm，盘径 320mm）绝缘子干、湿闪络

注：绝缘曲线按 IEC 出版物 383 和 B.S.137 第一部分的标准进行试验。

形成绝缘子表面污秽层的沉积物是多种多样的，但使绝缘子闪络电压降低最显著的是含有大量可溶性盐类或酸、碱的积尘。这些污秽常常是由一些化工企业排出的废气或海边盐雾集积在绝缘子表面而形成。有些黏附力很强的积尘，如水泥厂的飞尘，沉积在绝缘子表面后不易清洗掉，使绝缘子表面粗糙而更易积污，因此，对绝缘子的运行危害也很显著。长间隙和绝缘子串的工频闪络电压曲线如图 3-81 所示。

潮湿气候条件是引起绝缘污闪的必要条件。一般当空气相对湿度小于 50%～60%时，污秽绝缘子的沿面闪络电压降低很少，随着湿度增加，闪络电压迅速下降。运行经验证明，引起污闪的气象条件以雾、露、雪、毛毛雨为主。

2. 绝缘子表面污秽程度的表示方法

绝缘子表面污秽导致放电的关键是污秽物中水溶性物质（如盐）溶于水造成的导电性，而污秽物中不溶于水的成分（如硅藻土、黏土）的作用是在潮湿气候条件下吸收水分，保持污秽层潮湿，因此，绝缘子

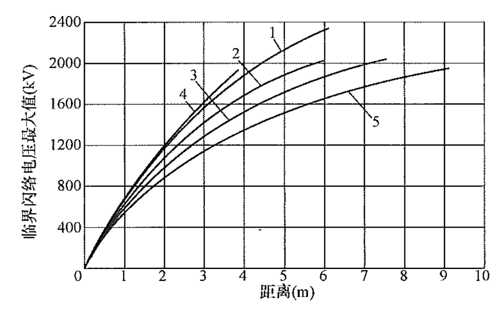


图 3-81　长间隙和绝缘子串的工频闪络电压曲线

1—棒－棒、环－环、导线－导线；2—导线－杆塔支柱；3—悬垂绝缘子串；4—垂直的棒－棒；5—棒－板

注：本曲线系亚历山德洛夫等的试验曲线。数据未进行气象校正，而是气象条件自然变化时所得多次重复试验的平均值。

表面脏污程度一般用下列两种方法表示：①用污秽质量及污秽导电性表示，即用绝缘子表面单位面积上的污秽质量（也称污秽密度，mg/cm^2）及污秽物加水成一定浓度（如 0.2%～1%）污液时的导电率（μS/cm）来表示；②用等值附盐密度及附灰密度来表示。等值附盐密度是指和污秽物导电性相当的、单位面积上的等值含盐量（mg/cm^2）。附灰密度是指绝缘子表面积上不溶于水的污秽物质量（mg/cm^2）。

3. 污秽绝缘子的工频闪络特性

图 3-82 列出了原东北电业管理局技术改进局（简称东北技改局）、原第一机械工业部高压电瓷研究所（简称西瓷所）、原第一机械工业部高压电器研究所（简称西高所）、清华大学、原天津电业局中心试验所（简称天津中试）等五个单位的 X－4.5 绝缘子的人工污秽及自然污秽的耐受电压测试数据。

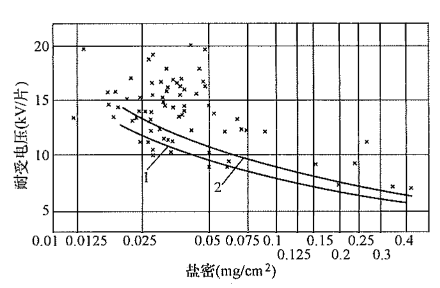


图 3-82　X－4.5 绝缘子人工污秽及自然污秽耐受电压曲线

1—五个单位（西瓷所、西高所、清华大学、天津中试、东北技改局）综合曲线（1977 年）；2—东北技改局曲线（1977 年）；×—自然污秽数据

表 3-41 及表 3-42 列出了一些国产悬式绝缘子的人工污闪及自然污闪的试验数据，这些数据均取自东北技改局 1975～1985 年陆续进行的一些试验。试验方法采用预沉积法（升压法），即被试污秽绝缘子在人工雾中受潮饱和后，立即升压至闪络。每串试品通常加

压三次，两次加压时间间隔约 1～2min，取三串试品　　的最低闪络电压平均值或九次闪络电压的平均值。

表 3-41　　几种国产小吨位悬式绝缘子的人工污闪试验数据

绝缘子型式		X－4.5	G210	XFP－4.5	XW_1－4.5	NF－4.5	C－104
几何尺寸（mm）	高度 H	146	146	146	160	170	190
	盘径 D	254	254	254	254	254	270
	爬电距离 L	280	320	400	410	430	460
	形状系数 $a=L/H$	1.92	2.2	2.74	2.56	2.53	2.42
爬电距离与 X－4.5 爬电距离之比		1.0	1.14	1.43	1.46	1.53	1.64
不同附盐密度（mg/cm^2）下的污闪电压 U_f（kV）/有效系数①	0.05	13.0/1.0	14.0/0.942	16.8/0.905	17.3/0.909	17.5/0.877	18.5/0.866
	0.1	10.1/1.0	12.5/1.083	13.0/0.901	15.0/1.014	15.4/0.993	15.6/0.94
	0.2	9.2/1.0	12.0/1.141	10.9/0.829	12.3/0.913	12.0/0.849	14.2/0.94
	0.4	8.3/1.0	8.5/0.896	8.5/0.717	10.4/0.856	8.1/0.635	
不同附盐密度（mg/cm^2）下的污闪电压梯度 $E_f=U_f/H$（kV）	0.05	0.89	0.959	1.15	1.08	1.03	0.974
	0.1	0.692	0.856	0.891	0.938	0.906	0.821
	0.2	0.63	0.822	0.746	0.769	0.706	0.748
	0.4	0.569	0.582	0.582	0.650	0.476	

① 有效系数 $=\dfrac{\text{单片标准绝缘子的爬电比距}}{\text{单片待求绝缘子的爬电比距}}=\dfrac{L_S}{U_{FS}}\Big/\dfrac{L_X}{U_{FX}}=\dfrac{U_{FX}}{U_{FS}}\times\dfrac{L_S}{L_X}$

式中　L_S、U_{FS}——标准绝缘子的单片爬电距离及单片污闪电压。表中取 X－4.5 为标准绝缘子；

L_X、U_{FX}——待求绝缘子的单片爬电距离为单片污闪电压。

从绝缘子的有效系数可以鉴别绝缘子几何爬电距离（L）增加的有效性。

表 3-42　　几种国产大吨位悬式绝缘子的人工污秽及自然污秽试验

绝缘子型式	制造厂家①	几何尺寸②（mm）				爬电距离和 XP－16 爬电距离之比	不同附盐密度/灰密/（mg/cm^2）下的人工污秽试验数据 [污闪电压 U_F（kV）/有效系数]						
		高度 H	盘径 D	爬电距离 L	形状系数 $a=\frac{L}{H}$		试验日期	试验串片数	0.025/1.0	0.05/0.2～1.0	0.1/0.4～1.0	0.2/1.0	0.4/1.0
XP－16	大瓷	155	254	312	2.01	1.0	1980年3～4月	3片串	37.9/1.0	32.4/1.0	27.7/1.0		20.3/1.0
XP_1－16D	淥瓷	156	280	340	2.18	1.09		3片串	41.0/0.992	35.4/1.0	30.7/1.02		23.0/1.04
XP_2－16D	淥瓷	156	280	359	2.3	1.15		3片串	44.9/1.03	37.5/1.0	31.4/0.985		21.9/0.985
XP－21	大瓷	168	280	342	2.04	1.096		3片串	42.2/1.016	36.3/1.022	31.4/1.034		23.3/1.047
XP_1－21	淥瓷	175	290	370	2.11	1.186		3片串	44.4/0.988	37.3/0.97	31.4/0.956		22.3/0.926
XP_2－21	淥瓷	175	290	380	2.17	1.218		3片串	47.4/1.027	41.0/1.039	35.5/1.052		26.7/1.08
XP－30D	淥瓷	199	320	399	2.0	1.279		3片串	48.4/1.0	41.0/0.99	34.8/0.982		25.0/0.85
XP－16	大瓷	155	254	292	1.88	1.0	1980年6～7月	3片串	35.5/1.0	30.3/1.0	25.8/1.0		18.7/1.0
XWP－16D	大瓷	155	290	398	2.57	1.36		3片串	38.2/0.79	33.2/0.804	30.1/0.856		23.6/0.926
XP_1－16D	湖瓷	155	274	344	2.22	1.18		3片串	38.3/0.916	31.9/0.894	26.6/0.875		18.5/0.84
XP_2－16D	湖瓷	158	283	361	2.28	1.24		3片串	36.4/0.829	32.4/0.865	28.7/0.9		22.7/0.98
XP_3－16D	湖瓷	158	281	379	2.4	1.3		3片串	37.9/0.823	33.6/0.854	29.8/0.89		23.4/0.964
XWP－16	西瓷	162	280	407	2.51	1.39		3片串	39.7/0.802	35.3/0.839	31.5/0.876		24.9/0.955
XP－16D	醴瓷	164	287	386	2.35	1.32		3片串	36.8/0.784	32.9/0.821	29.4/0.862		23.5/0.95
XP－$16D_1$	醴瓷	156	288	362	2.32	1.24		3片串	36.8/0.836	33.1/0.881	29.8/0.932		24.2/1.044

续表

绝缘子型式	制造厂家①	几何尺寸②（mm）				爬电距离和XP－16爬电距离之比	不同附盐密度/灰密/（mg/cm²）下的人工污秽试验数据［污闪电压 U_F（kV）/有效系数］						
		高度 H	盘径 D	爬电距离 L	形状系数 $a=\frac{L}{H}$		试验日期	试验串片数	0.025/1.0	0.05/0.2～1.0	0.1/0.4～1.0	0.2/1.0	0.4/1.0
XP－16D_3	醴瓷	156	307	406	2.6	1.39	1980年6～7月	3片串	46.9/0.95	40.2/0.954	34.4/0.959		25.2/0.969
XP－16D_4	醴瓷	164	300	445	2.71	1.52		3片串	45.2/0.835	38.8/0.84	33.3/0.847		24.6/0.863
XWP－16	醴瓷	160	280	420	2.63	1.44		3片串	40.3/0.789	35.2/0.808	30.8/0.83		23.5/0.874
XP16	大瓷	155	255	290	1.87	1.0	1985年9月	25片串		277.3/1.0	227.7/1.0	172.0/1.0	163.5/1.0
XP－16D_3	淥瓷	155	310	430	2.77	1.48		25片串		359.8/0.875	295.3/0.875	242.3/0.95	198.9/0.82
XP－16D	醴瓷	155	304	400	2.58	1.38		25片串		361.6/0.945	298.6/0.95	246.6/1.04	203.6/0.903
XP－16D_4	大瓷	155	300	425	2.74	1.47		25片串		368.8/0.908	297.1/0.89	239.4/0.95	192.9/0.805
LXP－16（玻璃）	南瓷	155	280	350	2.26	1.21		25片串		369.1/1.1	298.7/1.087	241.7/1.164	195.1/0.99

绝缘子型式	制造厂家①	自然污秽试验数据（每组试验周期为一年）［单片污闪电压 U_f（kV）/有效系数］									
		第一组	第二组	第三组	第四组	第五组	第六组	第七组	第八组	第九组	第十组
XP－16	大瓷										
XP_1－16D	淥瓷										
XP_2－16D	淥瓷	17.5/0.938		17.75/0.902							
XP－21	大瓷										
XP_1－21	淥瓷										
XP_2－21	淥瓷										
XP－30D	淥瓷										
XP－16	大瓷	15.78/1.0	12.3/1.0	16.25/1.0	12.7/1.0						
XWP－16D	大瓷										
XP_1－16D	湖瓷										
XP_2－16D	湖瓷	20.1/1.023	12.7/0.829	17.15/0.848							
XP_3－16D	湖瓷	15/0.727	17.1/1.064	17.2/0.81							
XWP－16	西瓷										
XP－16D	醴瓷										
XP－16D_1	醴瓷										
XP－16D_3	醴瓷				17.05/0.966						
XP－16D_4	醴瓷				19.8/1.02						
XWP－16	醴瓷										

续表

绝缘子型式	制造厂家[②]	自然污秽试验数据（每组试验周期为一年）[单片污闪电压 U_f（kV）/有效系数]									
		第一组	第二组	第三组	第四组	第五组	第六组	第七组	第八组	第九组	第十组
XP16	大瓷				11.73/1.0	19/1.0	14.46/1.0	12.7/1.0	8.94/1.0	21.2/1.0	
XP－16D$_3$	绿瓷				14.76/0.849	24.2/0.859	21.52/1.0	17.38/0.923	10.88/0.82	29.26/0.935	
XP－16D	醴瓷				16.52/1.02	22.05/0.84	22.04/1.1	18.2/1.04	11.18/0.907	30.42/1.04	
XP－16D$_4$	大瓷				16.28/0.947	22.25/0.8	20.04/0.95	17.15/0.92	12.74/0.97	30.46/0.98	
LXP－16（玻璃）	南瓷				15.2/1.074		20.96/1.2		11.43/1.06	30.42/1.19	

① 本表所列几何尺寸为试验时实量尺寸，不是定型尺寸。

② 大瓷—大连电瓷厂；渌瓷—渌江电瓷厂；湖瓷—湖北电瓷厂；西瓷—西安电瓷厂；醴瓷—瓷陵电瓷厂；南瓷—南京电瓷厂。

为了便于比较，列出了苏联及美国的两组试验曲线，供设计人员参考。

苏联对绝缘子的人工污秽试验采用预沉积污层法，但加压方式有两种，一种是在污秽绝缘子受潮前加电压，另一种则是在污秽受潮达饱和时立即加压，图 3-83 所列曲线即是按后一种方法取得的。

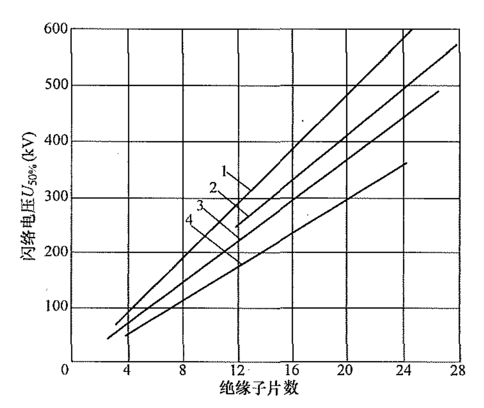


图 3-83　AC－30、П－11 绝缘子工频 50%污闪电压曲线

1—AC－30、$\eta=1$、$\rho=4$；2—П－11、$\eta=1$、$\rho=4$；3—П－11、$\eta=1$、$\rho=5$；4—П－11、$\eta=3$、$\rho=9$

η—绝缘子表面污秽密度，mg/cm²；

ρ—绝缘子表面电导率，μS/m

图 3－84 为美国特高压试验基地的一组试验曲线，其试验方法亦采用预沉积污层法，但在污秽绝缘子湿润以前施加电压。由图可以看出，随着绝缘子串长的增加，曲线显示出明显的饱和效应。图中最小闪络电压是指闪络概率为 12%～25%的闪络电压，这是因为特高压基地的污秽试验大部分是在并联的 2～4 串绝缘子串上进行的，其 50%闪络电压相当于单串的 12%～25%闪络概率的电压值。

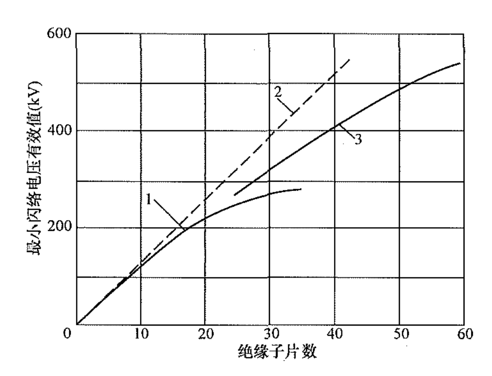


图 3-84　10″× $5\frac{3}{4}$″绝缘子串最小闪络电压和片数的关系曲线

1—在超高压（EHV）试验厅（12.2×12.2m²、高 8.54m）试验曲线；2—线性外推曲线；3—在特高压（UHV）试验厅（直径 24.4m、高 25.2m）的实验曲线附盐密度 0.07mg/cm²，高岭土 40g/L

由以上各图、表可以看出，绝缘子串污闪有以下一些特征：

（1）自然污秽条件下绝缘子的污闪电压数据比较分散，而且在多数情况下比人工污秽条件下的试验数据要高，这主要是由于自然污秽分布不均匀、污秽性质不同及其污秽附着密度与人工污秽有较大差别所致。

（2）大多数绝缘子的污闪电压提高倍数要低于其泄漏距离提高的倍数，所以，对这些绝缘子的泄漏距离存有一个有效性问题。在绝缘子片数选择时可用有效系数（见表 3-41 注①）来考虑。

（3）有效系数随污秽条件不同而有所差异。特别是自然污秽，由于绝缘子形状不同而在积污特性上所产生的差异，使得其污闪电压及有效系数分散性较大。因此，有效系数的选择应考虑人工污秽及自然污秽的试验情况综合确定，并最终由其在运行中的性能来判定。

（4）从国内外所提供的一些试验数据来看，绝缘子串的工频污闪电压与串长的关系，有的呈线性关系，有的则出现饱和现象，如图 3-83 及图 3-84 所示。出现这两种不同结果的原因，据有些文章分析，认为与试验方法有密切关系。若在加电压开始时绝缘子表面污秽层已完全湿润或在加电压过程中污秽层很快被湿润，则污闪电压与串长呈线性关系。而且，周围接地物体对污秽绝缘子串的闪络电压影响不大。若在绝缘子表面污秽层缓慢湿润之前先加以恒定电压，则污闪电压和串长呈饱和现象。这主要是由于接地构架（或周围接地体）对绝缘子串的邻近效应，使沿绝缘子串电压分布不均匀的缘故。因此，当按这种方法进行试验时，最好能模拟真型塔尺寸。不过由图 3-84 也可看出，对于 500kV 及以下不太长的绝缘子串，在污秽条件下可以认为串长与污闪电压呈线性关系。这就有可能允许按单片绝缘子的污闪电压来选择绝缘子所需片数。

据有关资料分析认为，水平耐张绝缘子串的污闪电压和悬垂串相差不多，究竟哪个高一些将因情况而异。

对于 V 形串，有关文献认为，外形较简单的标准型绝缘子 $10'' \times 5\frac{3}{4}''$组成 V 形串时，其污闪电压比悬垂串可提高 25%～30%，而由防污型绝缘子如 $15\frac{3}{4}'' \times 7\frac{3}{4}''$、$16\frac{1}{2}'' \times 8\frac{11}{16}''$、$15'' \times 7\frac{7}{8}''$组成的 V 形串，其污闪电压则比悬垂串仅提高 0%～10%。

4. 复合绝缘子的污闪特性

国内外的运行经验表明，以硅橡胶材料为伞裙护套的合成绝缘子有很强的耐污闪能力，即使表面已无憎水性，它的污闪电压也比瓷绝缘子高，相同结构高度的合成绝缘子的污闪电压比瓷绝缘子也高出 20%左右。在较重污秽地区合成绝缘子的爬电距离可取瓷绝缘子的 3/4，甚至 2/3，就可达到相应瓷绝缘子的耐污闪能力。美国的合成绝缘子的爬电比距取传统瓷绝缘的 4/5。GB 50545—2010《110kV～750kV 架空输电线路设计规范》规定，在轻、中污区复合绝缘子的爬电距离不宜小于盘型绝缘子；在重污区其爬电距离不应小于盘型绝缘子最小要求值的 3/4 且不小于 2.8 cm/kV；用于 220kV 及以上输电线路复合绝缘子两端都应加均压环，其有效绝缘长度需满足雷电过电压的要求。

（四）空气间隙的工频击穿特性

空气间隙的工频击穿特性曲线用于选择线路正常运行情况下所需空气间隙。对电压较低的线路，当缺乏操作过电压空气间隙击穿特性曲线时，亦可用于选择操作过电压所需空气间隙。

图 3-85 为棒－棒、棒－板击穿特性曲线。图 3-81 是苏联做的一组试验曲线，有文献认为该组曲线代表了现有长空气间隙的最好估计值，因此，被美国推荐作为美国的使用曲线。

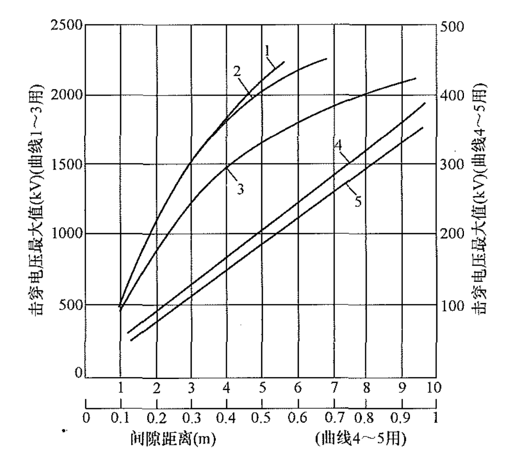


图 3-85 棒－棒、棒－板间隙工频击穿电压曲线

1—棒－棒（上棒长 5m，下棒长 6m），$\sigma\%=3\%\sim5\%$；

2—棒－棒（上棒长 5m，下棒长 3m），$\sigma\%=3\%\sim5\%$；

3—棒－板（棒长 5m，地面铺 $8\times8\text{m}^2$ 钢板，$\sigma\%=3\%\sim5\%$；

4—棒－棒（上棒长 1.5m，下棒长 3.6m），$\sigma\%<2.5\%$；

5—棒－板（棒长 1.5m，板为ϕ1.5m 圆钢板，离地 1.2m），$\sigma\%<1\%$

注：曲线已校正到标准状态。

棒－棒、棒－板是典型的对称及不对称间隙。试验结果表明，输电线路外绝缘中，所有电极形状对称的间隙（如导线－导线）都接近或相当于棒－棒间隙。所有电极形状不对称的间隙都接近于棒－板间隙。

图 3-86～图 3-92 分别列出了我国试验所获得的各种空气间隙工频击穿电压曲线，供参考使用。

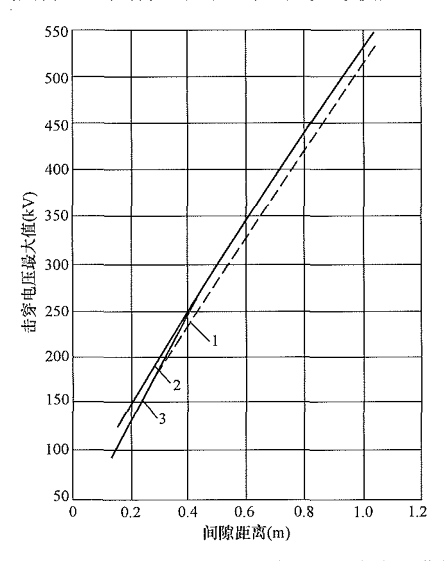


图 3-86 导线－水泥杆空气间隙工频击穿电压曲线

1—双分裂导线－门型水泥杆；2—单导线－上字型水泥杆杆身；3—单导线－上字型水泥杆斜拉杆

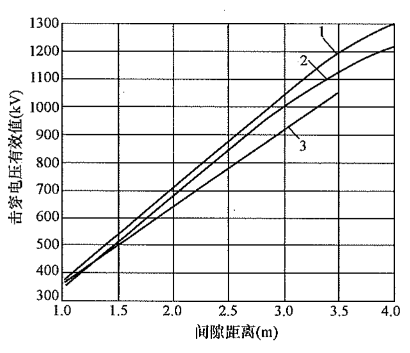


图 3-87 双分裂导线－铁塔工频击穿电压曲线

1—导线－导线；2—导线－杆塔支柱；3—导线－杆塔横担

本曲线摘自1967年2月原第一机械工业部高压电器研究所《330kV 输电线及变电所外绝缘特性试验报告》，分裂导线为水平排列，分裂间距为 300mm。数据已按 GB 311—1964 校正至标准状态。

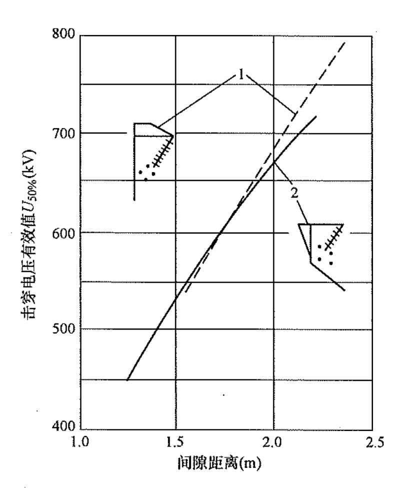


图 3-88 四分裂导线－塔构间隙工频击穿电压曲线

1—北京电力试验研究所门型塔边相试验曲线（1978 年）；

2—原水利电力部电力科学研究院高压研究所塔窗间隙试验曲线（1979 年）

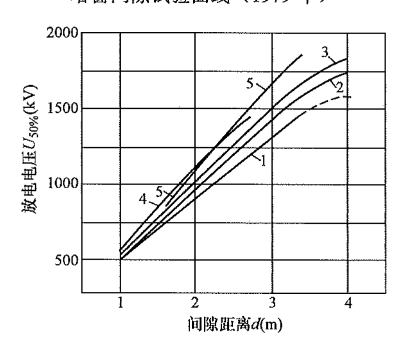


图 3-89 330kV 线路和变电站的空气间隙工频 50%放电电压曲线

1—导线对杆塔横担；2—导线对杆塔支柱；3—导线对导线；4—环对环，一环接地；5—环对环，双环均加压

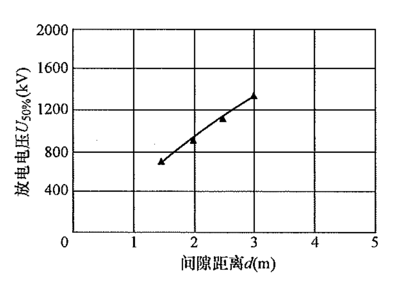


图 3-90 750kV 单回架空线路空气间隙的工频 50%放电电压曲线

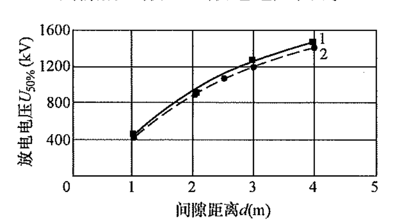


图 3-91 750kV 同塔双回线路空气间隙的工频 50%放电电压

1—中相；2—下相

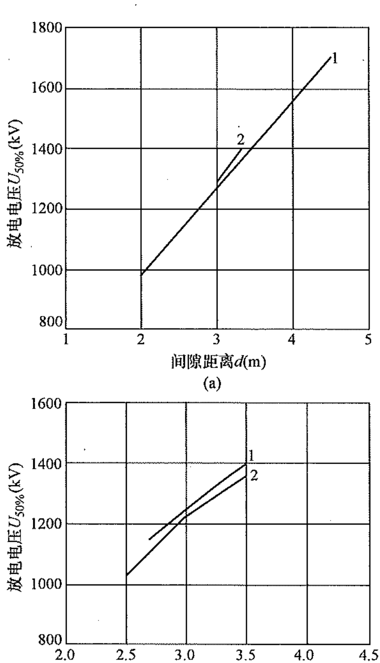


图 3-92 1000kV 导线对铁塔间隙的工频 50%放电电压曲线

（a）1000kV 单回路导线对铁塔间隙的工频 50%放电电压曲线

1—1000kV 单回线路猫头塔导线对塔身间隙的工频 50%放电电压曲线；

2—1000kV 单回线路酒杯塔导线对塔身间隙的工频 50%放电电压曲线

（b）1000kV 双回路导线对铁塔间隙的工频 50%放电电压曲线

1—1000kV 同塔双回，考虑风偏后，中相 I 串导线对塔身间隙的工频 50%放电电压曲线；

2—1000kV 同塔双回，考虑风偏后，下相 I 串导线对塔身间隙的工频 50%放电电压曲线

国外的一些试验指出，塔头空气间隙的工频击穿电压与塔身宽度 B 及相导线结构有关。

有文献指出，在塔身宽度为0.25～0.5m的范围内，塔头空气间隙的击穿电压与对应于导线的塔身宽度 B 之间，可以确立如下的关系式

$$U_{0.5(B)}=U_{0.5(1)}(1.03-0.03B) \tag{3-216}$$

式中 $U_{0.5(B)}$——塔身宽度为 B_m 时空气间隙的击穿电压；

$U_{0.5(1)}$——塔身宽度 $B=1$m时空气间隙的击穿电压。

关于相导线结构对塔头空气间隙的工频击穿电压的影响，《超高压送电线路设计》根据专门的研究得出以下规律：

绝缘距离 s 在 2m 以下时，击穿电压与相导线结构无关。

绝缘距离 s 在 2～5m 范围内时，把一种相导线结构的击穿电压换算到另一种导线结构，可以通过沿横坐标轴（s 轴）移动一Δs 距离后，再查击穿电压曲线上相应点的方法求得。Δs 可按下式计算

$$\Delta s=(R_{02}-R_{01})\times\frac{s-2}{3} \tag{3-217}$$

如相导线分裂半径为 $R_{02}=1$m，$s=3.5$m 的击穿电压，等于相导线分裂半径 $R_{01}=0.25$m，$s=3.5+(1-0.25)\times\frac{3.5-2}{3}=3.875$ 的放电电压。

绝缘距离（s）超过 5m 时，试验表明，当从相分裂导线对称轴到杆塔构件间的距离不变时，击穿电压与相导线的分裂半径无关。如当相导线分裂半径 $R_{02}=1$m，$s=7$m 时的击穿电压，等于相导线分裂半径 $R_{01}=0.25$m，$s=7+$（1－0.25）=7.75m 时的击穿电压。

（五）绝缘子片数的选择

在工频电压作用下，选择绝缘子片数的方法一般有两种：一种是按各类污秽条件下绝缘子串的成串污闪电压来选择；一种是按各类污秽条件下绝缘子串的爬电比距（λ）来选择。这两种方法的基本出发点都是以一定的线路允许的污闪事故率为基础。而且，这两种方法都需要首先确定线路所处地区的污秽等级。

1. 地区污秽度等级的确定

绝缘子表面的自然污秽物有 A、B 两类。A 类，含有不溶物的固体污秽物附着于绝缘表面，当受潮时污秽物导电。该类污秽物可通过测量等值盐密和灰密来表征其特性。B 类，液体电解质附着于绝缘表面，多含有少量不溶物。该类污秽物可通过测量导电率或泄漏电流来表征其特性，也可通过测量等值盐密和灰密来表征其特性。

A 类污秽普遍存在于内陆、沙漠或工业污染区；沿海地区绝缘子表面形成的盐污层，在露、雾或毛毛雨的作用下，也可视为 A 类污秽。A 类污秽含受潮时形成导电层的可溶污秽物和吸入水分的不溶物。可溶污秽物分为高可溶性盐（如快速溶解于水中的盐）和低可溶性盐（如很难溶解的盐）。不溶物如尘土、沙、黏土、油等。

B 类污秽主要存在于沿海地区，海风携带盐雾直接沉降在绝缘表面上；通常化工企业排放的化学薄雾以及大气严重污染带来的具有高电导率的大雾与毛毛雨也可列为此类。

绝缘子自然污秽的现场污秽度通常用等值盐密和灰密表示；对于 B 类污秽，也可用现场等值盐度即人工污秽盐雾法试验时的盐度值或绝缘子表面电导率表示。人工污秽试验时绝缘子表面污秽度用盐密和灰密表示（固体层法）；也可用等值盐度表示（盐雾法）。

目前代替 GB/T 16434—1996 的 GB/T 26218.1—2010《污秽条件下高压绝缘子的选择和尺寸确定　第 1 部分：定义、信息和一般原则》对污秽度等级的描述如下：

污秽度等级：从标准化考虑，从非常轻到非常重定义了五个污秽等级来表征现场污秽度：

a——非常轻；

b——轻；

c——中；

d——重；

e——非常重。

图 3-93 给出了普通盘形悬式绝缘子与每一现场污秽度等级相对应的等值盐密/灰密值的范围，该值是根据现场测量、经验和污秽试验确定的，是 3～5 年积污的测量结果。图 3-93 中数值是基于我国电网参

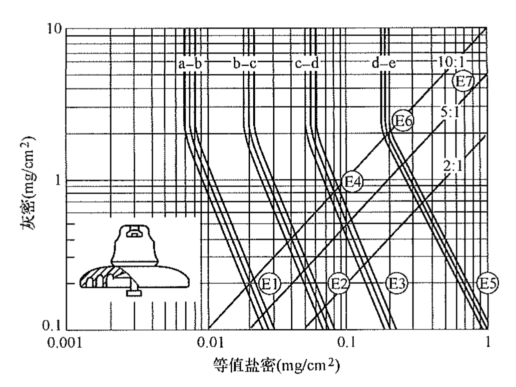


图 3-93　参照盘形悬式绝缘子现场污秽度与等值盐密/灰密的关系

（E1～E7 对应表 3-43 中的 7 种典型污秽示例，a－b、b－c、c－d、d－e 为各级污区的分界线。三条直线分别为灰密和等值盐密之比为 10∶1、5∶1、2∶1 的灰盐比线）

照绝缘子表面自然积污实测结果和 IEC 60815 第 2 部分规定的各级污区所用统一爬电比距并计及自然污秽与人工污秽的差别计算而得，而不是简单由人工污秽试验所得。现场污秽度从一级变到另一级不表明突变。典型环境和合适的污秽评估方法示例见表 3-43。

表 3-43　典型环境和合适的污秽评估方法示例

示例	典型环境的描述	现场污秽度（SPS 级）	污秽类型
E1	距海岸、盐渍开阔地、沙漠大于 50km①。 距人为污染源②（大中城市及工业区）大于 30km，植被覆盖好，人口密度很低的地区。 距上述污染源更短距离内，但 ● 主风不直接来自污染源方向； ● 每月规律性的雨水清洗	a 非常轻	A
E2	距海岸、沙漠或开阔干地大于 10～50km。 距人为污染源②（大中城市及工业区）积污期主导风下风 15～30km（其他方向取主导风下风距离的 1/2～1/3，以下同），或工业废气排放强度小于 1000 万 m^3/ km^2 的区域及人口密度 500～1000 人/ km^2 的乡镇区域。 距上述污染源更短距离内，但 ● 主风不直接来自污染源方向； ● 和/或每月规律性的雨水清洗	b 轻	A
E3	距海岸、沙漠或开阔干地大于 3～10km③，沿海轻盐碱和内陆中等盐碱（含盐量小于 0.3%～0.6%）地区。 距重要交通线 0.5km 及一般交通线 0.1km 内。 距大中城市及工业区积污期主导风下风 15～30km，各大集中工业区内乡镇工业废气排放强度不大于 1000 万～3000 万 m^3/km^2（标态下）区域及人口密度 1000～10000 人/ km^2 的乡镇区域	c 中	A
E4	距上述 E3 污染源更远一些（距离在"轻"的范围内），但 ● 在积污期常有持续 1 个月无降雨，且常常发生浓雾或毛毛雨； ● 含有高导电率的大雨； ● NSDD 高，在 5～10 倍的 ESDD 之间	c 中	A/B B A
E5	距海岸、沙漠或开阔干地 3km 内。 距人为污染源②1km 内，距大中城市及工业区积污期主导风下风 5～10km，距独立化工及燃煤工业源 1km，乡镇工业密集区及重要交通干线 0.2km，人口密度大于 10000 人/km^2 的居民区和交通枢纽	d 重	A
E6	比距 E5 污染源更长的距离，但 ● 在积污期常有持续 1 个月无降雨，常常发生浓雾或毛毛雨或融冰雪的 c 类地区； ● 含有高导电率的大雨； ● NSDD 高，在 5～10 倍的 ESDD 之间	d 重	A/B B A
E7	沿海岸直接承受海水飞溅与重盐海雾以及含盐量大于 1.0%的盐土与沙漠地区。 在化工、燃煤、水泥工业源区内及距此类独立工业源 0.5km 内，且直接承受高电导率或化工、燃煤、水泥类高密度污秽物以及被雾或毛毛雨润湿	e 非常重	B A/B A

① 在暴风雨期间，在距大海的该距离下，ESDD 可能达到很高值。
② 考虑大城市的影响，距离要更长一些，如取距海、沙漠或开阔干地的距离。
③ 取决于沿海地区的地形和风力强度。

在工程应用中，设计人员仍有可能采用 GB 50545—2010 附录 B 高压架空线路污秽分级标准的分类方法，表 3-44 列出相关内容供参考。

表 3-44　高压架空线路污秽分级标准

污秽等级	污湿特征	线路爬电比距（cm/kV）		
		盐密（mg/cm^2）	220kV 及以下	330kV 及以上
0	大气清洁地区及离海岸盐场 50km 以上无明显污染地区	≤0.03	1.39 （1.60）	1.45 （1.60）
I	大气轻度污染地区，工业区和人口低密集区，离海岸盐场 10～50km 地区。在污闪季节中干燥少雾（含毛毛雨）或雨量较多时	>0.03～0.06	1.39～1.74 （1.60～2.00）	1.45～1.82 （1.60～2.00）
II	大气中等污染地区，轻盐碱和炉烟污秽地区，离海岸盐场 3～10km 地区，在污闪季节中潮湿多雾（含毛毛雨）但雨量较少时	>0.06～0.10	1.74～2.17 （2.00～2.50）	1.82～2.27 （2.00～2.50）

续表

污秽等级	污湿特征	线路爬电比距（cm/kV）		
		盐密（mg/cm²）	220kV 及以下	330kV 及以上
Ⅲ	大气污染较严重地区，重雾和重盐碱地区，近海岸盐场 1～3km 地区，工业与人口密度较大地区，离化学污源和炉烟污秽 300～1500m 的较严重污秽地区	＞0.10～0.25	2.17～2.78（2.50～3.20）	2.27～2.91（2.50～3.20）
Ⅳ	大气特别严重污染地区，离海岸盐场 1km 以内，离化学污源和炉烟污秽 300m 以内的地区	＞0.25～0.35	2.78～3.30（3.20～3.80）	2.91～3.45（3.20～3.80）

注　爬电比距计算时可取系统最高工作电压。上表（ ）内数字为按标称电压计算的值。

2. 爬电比距法

GB 50545—2010《110kV～750kV 架空输电线路设计规范》推荐采用以绝缘子串的污闪电压与绝缘子片数呈线性关系为依据而确立的一种方法，其计算公式为

$$n \geqslant \frac{\lambda U_m}{L_e} = \frac{\lambda U_m}{K_e L_g} \tag{3-218}$$

式中　n——每串绝缘子所需片数。

U_m——系统最高电压，kV。

λ——不同污秽条件下所需爬电比距。

L_e——单片绝缘子有效爬电距离，cm。

L_g——单片绝缘子几何爬电距离，可按产品型录选取，cm。

K_e——绝缘子爬电距离的有效系数。根据 DL/T 1122—2009《架空输电线路外绝缘配置技术导则》，建议绝缘子爬电距离的有效系数按以下情况选取：

a）在以粉尘污染为主且风、雨自洁效果良好的地区（如华东地区），各种绝缘子的典型 K_e 值如下：

1）普通型、草帽型：取 1.0。

2）双层伞型、大小伞交替型（盘型悬式也称为三伞型，包括瓷长棒绝缘子、瓷或玻璃复合伞裙绝缘子）：取 1.0。

3）钟罩防污型、深棱伞型：不大于 c 级污秽等级，K_e 取 0.9；大于 c 级污秽等级，K_e 取 0.8。

b）在非粉尘污染的沿海地区，钟罩防污型、深棱伞型 K_e 值取 1.0。

c）在其他污秽类型地区，可按本地区运行经验选取。

由于这种选择方法是以实际线路的运行经验及事故率为依据的，零值绝缘子的影响已包括在内，所以不需要考虑可能出现零值绝缘子而再增加片数。GB/T 26218.1—2010 定义了统一爬电比距是绝缘子的爬电距离与该绝缘子上承受的最高运行电压的方均根之比。爬电比距法，是基于系统电压的。对于交流系统，这是相对相电压。而统一爬电比距（USCD）涉及的是绝缘子承受的电压，即对于交流系统是相对地电压。现场污秽等级与等值盐密的对应关系见表 3-45。统一爬电比距与现场污秽度的相互关系见图 3-94。

按统一爬电比距计算可采用如下公式。

$$n \geqslant \frac{\lambda_t U_{pm}}{L_e} = \frac{\lambda_t U_{pm}}{K_e L_g} \tag{3-219}$$

式中　n——每串绝缘子所需片数；

U_{pm}——系统最高相电压，kV；

λ_t——不同污秽条件下所需统一爬电比距。

其他参数意义同上式。

表 3-45　现场污秽等级与等值盐密的对应关系

污秽等级	等值盐密
a	0.025
b	0.025～0.05
c	0.05～0.1
d	0.1～0.25
e	＞0.25

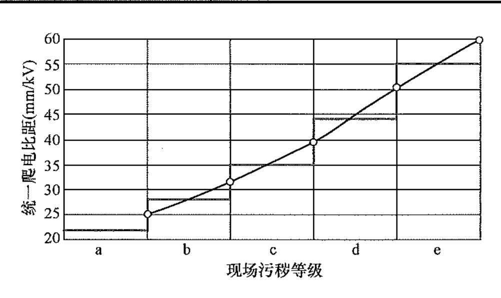


图 3-94　统一爬电比距与现场污秽等级相互关系

3. 污耐压法

污耐压法是根据试验得到绝缘子在不同污秽程度下的污秽耐受电压，使选定的绝缘子串的污秽耐受电压大于该线路的最大工作电压。该方法和实际绝缘子的污耐受能力直接联系在一起，是一种较好的绝缘子串长的确定方法。

在污耐压设计中，不同国家污秽外绝缘设计原则相同，仅是设计参数取值不同。不同的国家确定污耐压和污秽设计目标电压值也不同。主要是以 $U_{50\%}$进行污秽外绝缘设计，$U_{50\%}$以长串绝缘子试验来确定。

武汉高压研究所和中国电力科学研究院按试验来

计算 σ 取 7%，污耐压校正系数为 $1-3\sigma$。取最高运行相电压作为污闪耐压值（U_R）。

$$U_R = nU_{50\%}(1-3\sigma\%) = 0.79nU_{50\%} \quad (3\text{-}220)$$

式中 $U_{50\%}$——绝缘子单片的 50%污闪电压，kV；

n——绝缘子片数。

美国电机电子工程师学会（IEEE）取绝缘子污闪电压的标准偏差系数（以下简称标偏系数）$\sigma\%=10\%$，

$$U_R = nU_{50\%}(1-3\sigma\%) = 0.7nU_{50\%} \quad (3\text{-}221)$$

苏联选定绝缘的方法与我国（按污闪电压选绝缘子片数的方法）和美国相近。测试单片绝缘子的污闪电压（$U_{50\%}$）。标准偏差系数取 $\sigma\%=8\%$。耐压值（U_R）取为最高运行相电压。

$$U_R = nU_{50\%}(1-4\sigma\%) = 0.68nU_{50\%} \quad (3\text{-}222)$$

$U_{50\%}$可由成串污闪数据取得。对 500kV 及以下线路，也可由单片 $U_{50\%}$按线性关系选定。但对特高压线路，则应考虑串长的非线性。采用长串数据。由于污秽闪络电压梯度与绝缘子串长呈不严格的线性关系，因此爬电比距法采用的由 2～5 片短串绝缘子 50%人工污秽工频耐受电压试验结果推算至 1000kV 级交流输电线路用绝缘子长串会带来很大偏差。

（六）工频空气间隙的选取

按工频电压选取线路带电部分（考虑绝缘子串在最大设计风速下风偏后）和杆塔构件间的最小空气间隙距离时，此间隙的工频 50%击穿电压（最大值）$U_{50\%}$应满足式（3-223）要求。风偏计算用的风速应取线路设计采用的基本风速折算到导线平均高度处的风速。

$$U_{50\%} \geqslant K_2 \cdot \sqrt{2}U_m/\sqrt{3} \quad (3\text{-}223)$$

式中 K_2——线路空气间隙持续运行电压统计配合系数，取 1.13；

U_m——最高运行电压有效值，kV。

算出空气间隙 $U_{50\%}$数值后，查相应电极型式的空气间隙 $U_{50\%}$击穿电压曲线即可得所需空气间隙距离的数值。

（七）绝缘配合的有关规程规定

1. 空气间隙有关规定

GB 50545—2010 及 GB/T 50064—2014 对各级电压线路最小运行（工频）电压空气间隙距离做了规定，现归纳见表 3-46。

表 3-46 输电线路最小运行（工频）电压空气间隙 m

标称电压（kV）	35	66	110	220	330	500	750	1000
工频电压	0.1	0.2	0.25	0.55	0.90	1.3（1.2）	1.9（1.8）	2.9（2.7）

注 表内数值适用于海拔 1000m 及以下的地区，括号内数值适用于海拔 500m 及以下地区。

2. 工频污秽条件绝缘子选择有关规定

根据 DL/T 1122—2009《架空输电线路外绝缘配置技术导则》，工频污秽条件下绝缘子选型及爬电距离要求应按如下条件考虑。

（1）悬垂串绝缘子选择。

1）在工业型或农业型的 c 级及以上且以粉尘污秽为主要污染物的污秽区：

a. 宜选用复合绝缘子（棒型或盘型）；

b. 在风、雨自洁效果良好的地区可选用空气动力型绝缘子（如双层伞型、三伞型、大小伞交替型绝缘子和瓷长棒型绝缘子等）；

c. 新建线路不宜使用钟罩防污型或深棱伞型绝缘子；

d. 对于已运行线路，可根据绝缘子爬距的有效系数进行调整配置（不同型式）。

2）在 c 级以下污秽等级且以粉尘污秽为主要污染物的污秽区（工业型或农业型）可根据运行经验选用绝缘子型式，并应按绝缘子爬电距离的有效系数进行配置。

3）在沿海型和内陆型等非粉尘污染地区，可选用防污型绝缘子（包括钟罩型或深棱型绝缘子等）。

4）在沙漠型污秽地区，宜选用空气动力型（含草帽型）以及棒型绝缘于（棒型、盘型复合绝缘子和瓷棒型绝缘子）。

5）水泥厂等高粉尘区域附近可采用自洁性能优良的绝缘子并适当增加爬距。

（2）耐张串绝缘子的选择。

1）一般应选用自洁性能好的绝缘子，如普通型、双伞型、三伞型的瓷、玻璃和复合盘型绝缘子以及瓷长棒型绝缘子等。

2）在以粉尘污秽为主污染源的污秽区，新建线路不宜使用钟罩型（深棱型）绝缘子；对于已运行线路，应根据当地运行经验进行配置。

3）在雨水充沛地区，d 级以下的污秽等级新建线路，按实际污秽等级配置，对于 d 级及以上污秽秽等级新建线路，统一爬电比距（USCD）按不低于 44mm/kV 配置。

4）在干旱少雨地区，按实际污秽等级配置。

5）对运行线路应结合当地运行经验适当调整。

（3）复合棒型、盘型绝缘子的统一爬电比距（USCD）和爬电系数按如下原则配置：

1）对 c 级及以下污秽等级使用复合绝缘子，其统一爬电比距（USCD）可选取 32～39mm/kV；

2）对 d 级及以上的污秽等级，统一爬电比距（USCD）可选取不低于 44mm/kV，宜使用大小伞结构；

3）对 c 级及以下污秽等级爬电系数（C.F.）应不大于 3.2；

4）对 d 级污秽等级爬电系数（C.F.）应不大于 3.5；

5）对 e 级污秽等级爬电系数（C.F.）应不大于 3.8。

在特殊地区，如受结构高度等条件限制，爬电系数（C.F.）可由供需双方协商确定。串长过大时则按 V 串配置。

爬电系数也叫爬距系数，指绝缘子的爬电距离与干弧距离之比。

（4）双悬垂串绝缘子如采用 V 型或倒 V 型布置，爬距配置应按相应污秽等级要求配置：如采用平行双 I 串布置，两串绝缘子中心水平间距小于 600mm 时爬距配置应比相应悬垂单串的污秽等级要求提高 8%，不小于 600mm 时，其爬距配置按悬垂串的污秽等级要求进行。

（5）不同雷电地区复合绝缘子选用要求见本章第八节五、所述。

（八）工频电压下线路跳闸率的统计计算

线路工频跳闸率的大小是衡量线路运行可靠性的重要指标。根据我国各级电压线路大量运行统计资料表明，110kV 线路的工频闪络跳闸率为 0.15～0.28 次/（100km·年），220kV 线路为 0.1～0.13 次/（100km·年），330kV 线路为 0.05 次/（100km·年）。

工频电压作用下线路塔头部分闪络引起跳闸的主要原因是绝缘子串或空气间隙闪络。由于设计最大风速出现的概率甚低（30～100 年一遇）且风速宽度较窄，加以在实际定塔位时大风间隙用足的塔位一般不超过 10%～20%，因此，实际上塔头空气间隙工频闪络的机会很少，所以，在计算线路工频跳闸率时可只考虑绝缘子串在雾湿天气下的闪络，这样就可使计算大为简化。

假定绝缘子串的污闪电压服从正态分布，当线路绝缘子串的污闪电压及其标偏系数选定后，即可按式（3-224）计算并查正态概率分布表，得到一串绝缘子在一次雾湿天气下发生污闪的概率 P_1。

$$P_1=\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_I^2}}\int_{-\infty}^{u}e^{-\frac{(u-U_I)^2}{2\sigma_I^2}}du=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\frac{U_p-U_I}{\sigma_I}}e^{-\frac{t^2}{2}}dt \tag{3-224}$$

式中 U_p——线路运行相电压，kV；

U_I——绝缘子串的 50%污闪电压，可由成串污闪试验取得，亦可由单片 50%污闪电压（$U'_{50\%}$）乘片数而求得，kV；

σ_I——U_I 的标准偏差，$\sigma_I=U_I\sigma\%$。

知道每百千米的绝缘子串数 N，即可按式（3-225）计算一次雾湿天气下每百千米的污闪概率。

$$P_N\approx NP_1 \tag{3-225}$$

若每年的雾湿日统计天数为 M，则可求出每年每百千米线路的工频闪络概率为

$$P\approx MP_N \tag{3-226}$$

相反，若要求按每年每百千米线路的工频闪络概率（P）来确定所需绝缘子的片数，则可按式（3-225）及式（3-226）求出单串绝缘子在一次雾湿天气下的污闪概率 P_1，然后用式（3-224）求出所需绝缘子的片数。

【例 3-5】 1 条 500kV 线路长 100km，用 28 片 XP-160 绝缘子，线路所处地区的 ESDD/NSDD 为 0.1/1.0（mg/cm²），每片绝缘子的污闪电压 $U'_{50\%}=7.43$kV（武高所），求每年每百千米线路的闪络概率。

解 每串绝缘子的污闪电压为

$$U_1=n\cdot U'_{50\%}=28\times7.43=208\text{kV}$$

设 $\sigma_I\%=8\%$，则每一串绝缘子在一次雾湿天气下的闪络概率（P_1）可计算如下

$$P_1=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\frac{U_P-U_I}{\sigma_I}}e^{-\frac{t^2}{2}}dt$$

$$\frac{U_P-U_I}{\sigma_I}=\frac{\frac{500}{\sqrt{3}}-208}{208\times8\%}=-4.85$$

查正态分布表得 $P_1=1.02\times10^{-6}$

若假定每百千米线路有 750 串绝缘子，并假定线路所处地区每年的雾湿天气为 40 天，则每年每百千米线路的闪络概率为

$$P=MNP_1=40\times750\times1.02\times10^{-6}$$
$$=0.0306\ 次/（100\text{km}\cdot年）$$

四、操作过电压绝缘设计

操作过电压是电力系统中由于开关操作或事故状态引起的过电压。操作过电压的类型很多，其频率约几十赫兹到几千赫兹，幅值最高可达 3～4 倍最大相电压，因此，电力系统的绝缘尚应按能耐受操作过电压来考虑。早期的观点认为，可用工频放电电压乘以操作冲击系数来代表操作冲击放电电压进行绝缘选择。随着系统电压的不断提高，各国对操作过电压进行了广泛的研究。通过研究发现，在操作冲击波作用下，外绝缘放电有许多与工频放电不同的新特点，所以，现在一致认为，特别对 330kV 及以上的输电线路，绝缘的操作冲击特性应采用操作冲击波作用下的试验数据。

（一）操作过电压参数的特性

与线路绝缘设计有关的操作过电压参数主要是幅值、波头长度、极性及过电压沿线长的分布等，而这些参数都具有统计特性。

1. 操作过电压幅值及其分布

线路绝缘在运行中可能受到的操作过电压主要有

合闸及重合闸过电压、电网故障解列及振荡解列过电压、空载线路分闸过电压等。为了降低这些过电压的幅值，一般均采用加装并联电阻的断路器、装设并联电抗器以及避雷器等。切空线及系统解列过电压一般不作为线路绝缘设计的依据，因此，仅考虑合闸、单相重合闸和三相重合闸（如运行中使用时）的情况。

测试表明，操作过电压幅值具有正态分布、韦布尔分布或极值分布的特征。在进行绝缘设计时，一般均假定幅值为正态分布。相应的分散性用标偏系数$\sigma\%$来表示。$\sigma\%$一般在5%～20%范围内。

操作过电压的幅值一般用$U_{max}=U_{50\%}(1+3\sigma\%)$及$U_{2\%}=U_{50\%}(1+2.05\sigma\%)$来表示。在正态分布中，$U_{max}$指大于它的过电压值出现的概率仅0.135%，$U_{2\%}$指大于它的过电压值出现的概率为2%。

我国对220～500kV的各级电压线路均进行过模拟及实际的测试。测试结果表明，220kV线路的U_{max}值为(2.97～3.2)U_{pm}（U_{pm}为最高运行相电压有效值），$\sigma\%$为19%～20%。330kV线路的U_{max}=（2.33～2.38）U_{pm}，$\sigma\%$=12.6%～15.4%。500kV线路的$U_2\%$=（1.54～2.02）U_{pm}，U_{max}=（1.66～2.15）U_{pm}，$\sigma\%$=5%～15%。

国际电工委员会（IEC）对7个国家100kV以上电网操作线路的过电压值统计结果表明，超过2.63倍的过电压出现的概率为2.24%。Field and Analyzer Results for Transmission Line Past、Present and Future Trends对国外过去十几年内在345～500kV线路上实测或模拟测试的数据进行了综合分析，结果表明，$U_{2\%}$为(1.37～2.09)U_{pm}，$\sigma\%$=2.9%～19.6%。

GB 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》对设计应选用的操作过电压最大幅值做了规定，范围Ⅰ系统计算用相对地最大操作过电压的标幺值，35kV及以下低电阻接地系统取3.0，66kV及以下非有效接地系统（不含低电阻接地系统）取4.0，110kV及220kV系统取3.0。6～220kV系统，相间操作过电压可取相对地过电压的1.3～1.4倍。范围Ⅱ架空线路确定其操作过电压要求的绝缘强度时，应采用将过电压幅值和绝缘强度作为随机变量的统计法。每回线路的操作过电压闪络率对330、500kV和750kV线路分别不宜高于0.05次/年、0.04次/年和0.03次/年。范围Ⅱ空载线路合闸和重合闸产生的相对地统计过电压，对330、500kV和750kV系统分别不宜大于2.2p.u.（标幺值）、2.0p.u.和1.8p.u.。GB 24842—2009《1000kV特高压交流输变电工程过电压和绝缘配合》规定1000kV线路相对地统计操作过电压不宜大于1.7p.u.。

2. 操作过电压波头长度的分布

操作过电压波头长度对设备绝缘强度的影响较大。为此，国内外不少单位对波头长度进行了实测和研究。

我国原第一机械工业部高压电器研究所曾对110～330kV线路的操作过电压波头长度的实测数据进行过统计分析，得出操作过电压波头范围为

110kV电网：300～1800μs，多数在1000μs左右；

220kV电网：800～3500μs，多数在1000μs左右；

330kV电网：1000～5000μs（自振频率10～200Hz），多数在1500～3000s。

我国原水利电力部电力科学研究院高压研究所曾对八条220kV线路的实测波形进行了统计分析，得知其自振频率为125～225Hz，波头平均长度为1771～3807μs，多数在1000～2500μs之间，最短波头长度为365μs。1982年原水利电力部电力科学研究院高压研究所又对500kV电网进行了模拟测试，见表3-47。

表3-47　500kV线路波头长度统计分布

操作方式		合闸	重合闸
波头长度平均值（μs）		3338	2528
波头长度超过下列时间的概率（%）	250	100	99.8
	500	100	98.3
	1000	99.5	91.3
	2000	88.4	63.2
	3000	59.0	27.2
	4000	24.9	9.9
	5000	8.6	4.3
统计分布规律		有统计方法均服从韦布尔分布，按$\tau_{85\%}$统计方法，尚服从正态分布	

美国曾在345kV、100～250km线路上实测了波头长度的分布。尽管线路较短，多数波头长度仍达1000μs。另外，在500kV线路上测得的波头平均长度约在2000μs及以上。

苏联在电网中测试表明，操作过电压波头长度为600～4500μs，90%以上的波头长度大于1000μs。

关于操作过电压波头长度与幅值是否相关的问题，原水利电力部电力科学研究院高压研究所对220kV及500kV线路均进行过统计分析。分析表明，二者相关程度极弱。

3. 操作过电压极性的分布

测试表明，操作过电压的正、负极性所占比例大体相等。原水利电力部电力科学研究院高压研究所对500kV电网模拟测试所得结果，正、负极性所占比例分别为55%及45%。

4. 操作过电压沿线长的分布

操作过电压幅值沿线长的分布是不均匀的。原水利电力部电力科学研究院高压研究所曾按某条 500kV 线路参数，就合闸与重合闸时的操作过电压沿线长的分布（见图 3-96）进行了模拟测试，如图 3-95 所示。

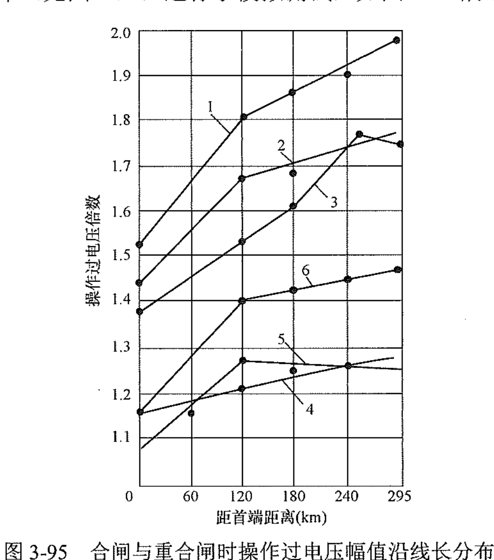


图 3-95 合闸与重合闸时操作过电压幅值沿线长分布

1—合闸、无电抗器、无断路器并联电阻；
2—合闸、无电抗器、有 1000Ω 断路器并联电阻；
3—合闸、有电抗器、无断路器并联电阻；
4—合闸、有电抗器、有 1000Ω 断路器并联电阻；
5—重合闸、无电抗器、有 400Ω 断路器并联电阻；
6—重合闸、无电抗器、有 1200Ω 断路器并联电阻

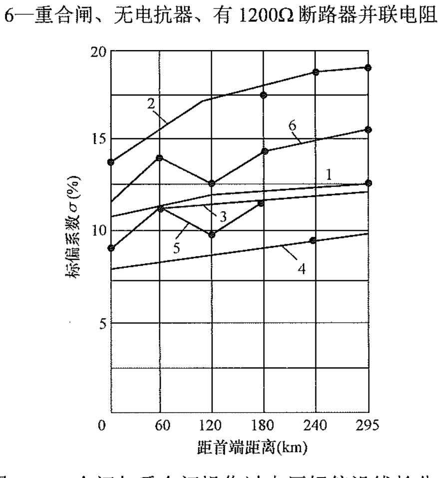


图 3-96 合闸与重合闸操作过电压标偏沿线长分布

1—合闸、无电抗器、无断路器并联电阻；
2—合闸、无电抗器、有 1000Ω 断路器并联电阻；
3—合闸、有电抗器、无断路器并联电阻；
4—合闸、有电抗器、有 1000Ω 断路器并联电阻；
5—重合闸、无电抗器、有 400Ω 断路器并联电阻；
6—重合闸、无电抗器、有 1200Ω 断路器并联电阻

由图 3-95、图 3-96 可以看出，合闸与重合闸时操作过电压幅值与标偏基本上随距线路首端距离增加而增大。

（二）操作过电压的绝缘放电特点

线路绝缘在操作波作用下的放电也具有统计特性，并有如下特点。

（1）极性效应。试验表明，绝缘的正极性放电电压比负极性低。由图 3-97 列出的典型棒－棒、棒－板间隙正、负极性操作波的击穿电压曲线可以看出，随着间隙距离增加，正、负极性的差别也增大，而且，不对称间隙（棒－板）的正、负极性差别比对称间隙（棒－棒）大。

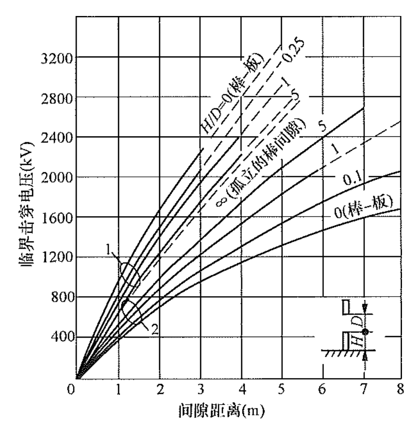


图 3-97 棒－棒、棒－板间隙操作波击穿电压曲线

1—负极性；2—正极性波头长度 100～200μs，
蒸汽压力≈1.69×10^3Pa

鉴于绝缘的正极性操作冲击放电电压比负极性低，而在实际线路上出现正、负极性操作波的概率大体相等，因此，选择线路绝缘强度时应以正极性操作波为准。

（2）邻近效应，指周围接地物体对绝缘放电电压的影响。由图 3-98 可以看出，当接地板靠近间隙时，会大大降低其正极性闪络强度，但却能提高负极性闪络强度。而且，随着间隙距离的增加，邻近效应的影响增大。

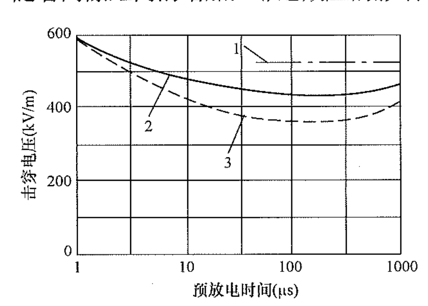


图 3-98 每米 50%击穿电压对预放电时间的关系曲线（3m 间隙）

1—工频 50%击穿电压；2—棒－棒间隙；3—导线－平板间隙

由于绝缘在正极性操作波作用下具有明显的邻近效应，所以，对超高压和特高压线路均普遍提倡在真型塔上进行绝缘的操作冲击放电电压试验。

（3）电极形状的影响。电极形状对绝缘的正极性

操作冲击放电电压的影响比工频，特别比雷电冲击的影响要大，见图 3-85、图 3-97。

（4）波头长度的影响。图 3-99 说明了波头长度对间隙击穿电压的影响。雷电冲击击穿电压最高，操作冲击击穿电压在一定的波头范围内低于工频击穿电压，但当波头长度增至 2500～3000μs 时，其 50%击穿电压的平均值实际上接近工频均匀升压下的击穿电压。这表明击穿特性曲线呈 U 形特性。由图 3-99 及图 3-100 可以看出，在操作波作用范围内，在某一波头长度下，绝缘的操作冲击 50%放电电压最低，称为临界 50%放电电压 $U_{050\%}$，相应的波头长度称为临界波头长度 T_0。随着绝缘距离的增大，临界波头长度 T_0 也增大。

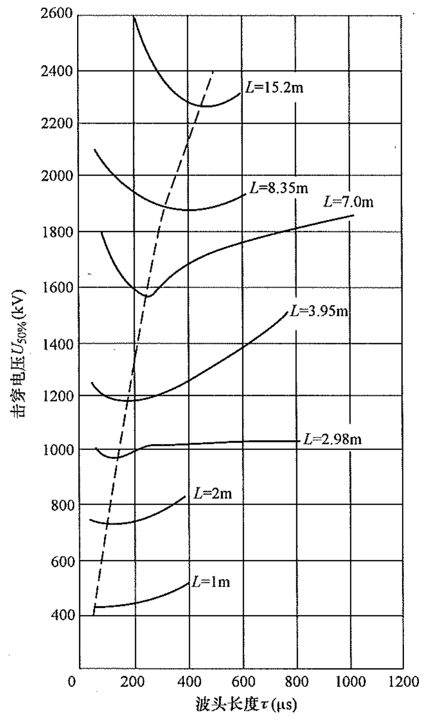


图 3-99 棒－板间隙正极性操作冲击击穿电压和波头长度的关系
L—间隙距离

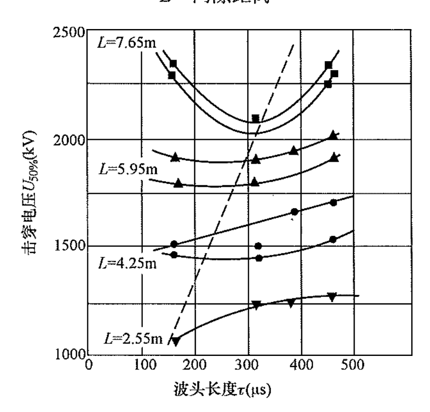


图 3-100 悬垂绝缘子串正极性操作冲击闪络电压与波头长度关系
L—绝缘子串长度；●■▲—湿闪
本曲线摘自日本 NGK 资料

为了能粗略地估计各间隙情况下的 T_0 及 $U_{050\%}$，现引用如下经验公式以供参考，即

$$\left.\begin{aligned}&\text{棒－板间隙}\quad T_0=48d\\&\text{棒－棒间隙}\quad T_0=24d\end{aligned}\right\}\tag{3-227}$$

$$U_{050\%}=3400\times\frac{3400}{1+\dfrac{8}{d}}\quad(1<d<20\text{m 时})\tag{3-228}$$

式中 d——间隙距离，m。

国外认为，绝缘的操作冲击放电电压的标偏系数（σ%）也是波头长度的函数，也具有 U 形特性，而且，最小 σ%值的波头长度与临界波头长度也基本一致，如图 3-101 所示。但在我国所做的悬垂绝缘子串塔头间隙试验则尚未表明有此种规律，见表 3-48。

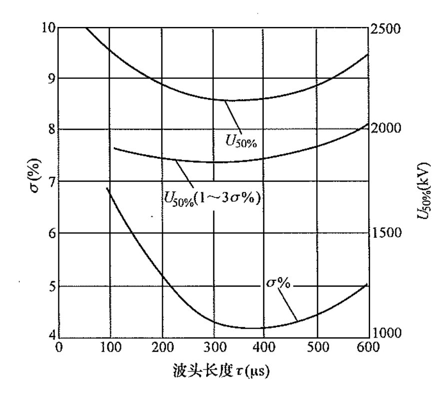


图 3-101 击穿电压（$U_{50\%}$）和标偏系数（σ%）与波头长度的关系
（8.75m 的绝缘子串对杆塔间隙）

（5）标偏系数。绝缘在工频和雷电冲击波作用下，其放电电压的标偏系数（σ%）一般为 2%～3%，而在操作波作用下，其标偏系数可达 2%～10%。

（6）具有明显的“饱和”效应。如图 3-102 所示，随着距离的增加，平均操作放电电场强度急剧下降。

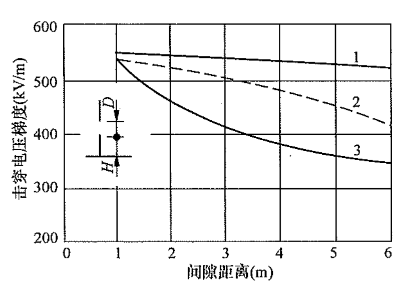


图 3-102 击穿电场强度随间隙距离变化曲线
1—1.2/50μs 冲击波；2—工频；3—200/2000μs 冲击波棒－棒间隙；$H/D=1.0$，正极性、干燥天气

这一情况比工频和雷电冲击情况都要严重。因此，尽量降低线路操作过电压水平，消除不必要的设计裕度，对超高压和特高压线路来讲非常重要。

（三）操作波波形

在实际系统中操作波的波形是非常复杂的。目前各国主要使用了如下几种波形：

（1）指数型冲击波，如图 3-103（a）所示，它是一种波头很陡、衰减较慢的波。目前这种波应用较广。

（2）衰减振荡型冲击波，如图 3-103（b）所示，它是一种极性呈周期性变化的波。振荡频率从数十到数百赫兹，即其 1/4 周期（相当于波头）为数百到数千微秒。苏联采用这种波形。一般多用于湿闪试验和污秽试验。

（3）斜角波。如图 3-103（c）所示，它是一种以近似恒定的陡度上升的电压波，其幅值被击穿电压所限制。这种波多用于避雷器试验和绝缘的伏秒特性试验。当 $\Delta t/T_R \leqslant 0.05$ 时可以认为是斜角波。

表 3-48　500kV 悬垂绝缘子串塔头间隙放电电压（$U_{50\%}$）与标偏系数（$\sigma\%$）

试验单位	间隙型式	被比较的参数	试验用波形				
			+175/2500	+250/2500	+500/3200 +500/3750 +500/2500	+1000/5400	+2000/12000
原水利电力部东北电力试验研究院	500kV 猫头型塔中相塔窗	放电电压（$U_{50\%}$）比	1.03～1.07	1.0	1.1～1.19	1.14～1.23	1.19～1.26
		$\sigma\%$变化范围	2.5～5.9	2.9～4.4	2.0～3.6	3.4～5.6	2.0～4.9
原水利电力部电力科学研究院高压研究所	500kV 酒杯型塔中相塔窗	放电电压（$U_{50\%}$）比		1.0	1.09～1.14		
		$\sigma\%$变化范围		5.1～7.2	4.0～5.5		
北京电力试验研究所	500kV 门型塔边相	放电电压（$U_{50\%}$）比		1.0	1.027～1.04		
		$\sigma\%$变化范围		3.0～5.4	2.0～5.7		

注　表中标偏系数 $\sigma\%$ 系用升降法求得。

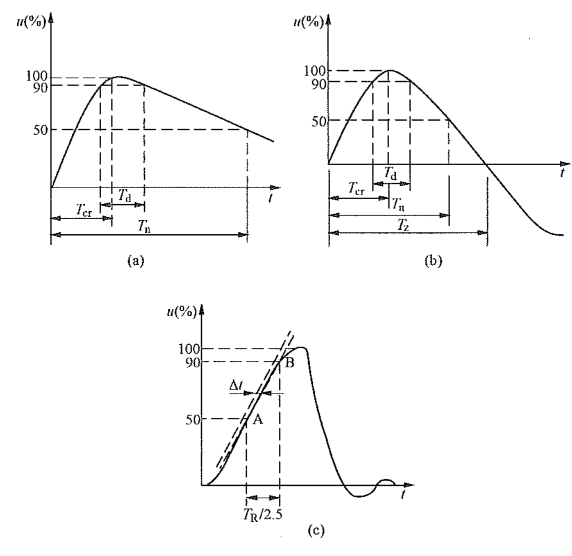


图 3-103　操作冲击试验用波形

（a）指数型冲击波；（b）衰减振荡型冲击波；（c）斜角波

T_{cr}—波头长度（或称波前时间）；T_n—半峰值时间；

T_d—90%峰值以上时间；T_R—斜角波上升时间；

T_z—第一半波时间；S—斜角波视在陡度（即 AB 直线的斜率）

GB/T 311.1—2012《绝缘配合　第 1 部分：定义、原则和规则》推荐的操作波的波形及有关规定如下：

标准操作冲击波：指波头长度（T_p）为 250μs，半峰值时间（T_2）为 2500μs 的指数型冲击波，可以写为 250/2500 冲击波。

在某些情况下，如低阻抗的试品，将波形调节在推荐的容许偏差之内可能有困难，此时，可以采用其他冲击波形和允许偏差。

其中斜角操作冲击试验的测量结果，通常可用伏秒曲线来表示。由于它的实用范围很广，没有必要规定任何特定的波头陡度或预期的波头长度，也不需要规定这些数值的容许偏差。

（四）塔头绝缘操作冲击的影响因素及试验数据（或曲线）的选用

当按要求的操作过电压水平来选择绝缘子片数及塔头空气间隙距离时，都需要有关的试验数据或曲线。但由于国内外各试验研究单位在进行外绝缘操作冲击试验时所选用的试验参数（如操作波波型、极性、波头长度、试品布置方式、气象条件等）有所不同，试验设备及条件（如室内、室外、试验厅大小等）也存有差异，这使得各数据（或曲线）分散性很大，有的甚至相互矛盾，而这些差异或矛盾是很难相互统一归算的。因此，在设计选用时，应尽可能选用与设计要求相当的数据（或曲线），同时尚应注意以下方面。

1. 操作波极性的选用

如前所述，空气间隙的正极性击穿电压比负极性低，所以，设计时应选用正极性击穿电压数据（或曲线）。

对于悬垂绝缘子串，虽然有的试验表明，在淋雨的湿状态下（特别在雨量较大时），其负极性闪络电压比正极性低，但从各国大量的试验数据统计来看，无论干闪或湿闪，几乎都是正极性比负极性的闪络电压

低（特别在雨量较小时），或正、负极性的闪络电压基本相同，因此，在设计时仍应以正极性为准。

2. 干、湿闪数据（或曲线）的选用

试验表明，降雨对空气间隙的击穿电压影响很小，所以，设计时对空气间隙可选用干击穿电压的数据（或曲线）。各试验单位提供的数据（或曲线）也都是干击穿电压的数据（或曲线）。

3. 电场分布影响的修正

输电线路塔头绝缘，由于其电极形状不同、塔头布置及塔身宽度不同，以及离地高度不同等，均使其电场分布受到影响，因而影响放电电压。所有这些因素，在设计时均应适当考虑。

（1）布置的影响。输电线路的导线布置，从电气设计角度来看一般可分为三种形式，即：窗型（如酒杯型及猫头型塔中相）、门型及倒 L 型（如酒杯型、猫头型及门型塔边相）。为了了解这些形式对塔头绝缘放电电压的影响，国内外都进行了一些试验，所得数据比较分散。

图 3-104 及图 3-105 示出了日本 NGK 试验室对悬垂绝缘子串的试验数据。试验波形为＋145/2700μs，干闪，试验方法采用升降法，每组试验 40 次。

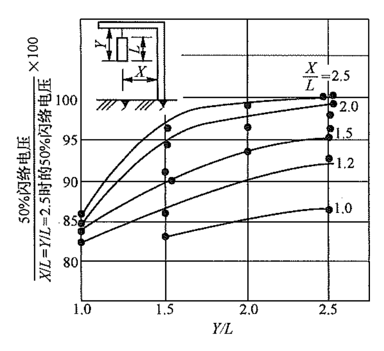


图 3-104 塔构对悬垂绝缘子串操作冲击闪络电压的影响

试品为 22 片 190×320mm 绝缘子（无环），图中 100%闪络电压为 1845kV

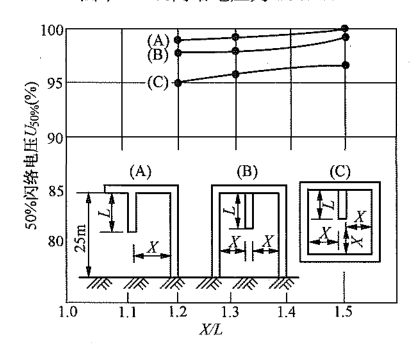


图 3-105 塔头布置对悬垂绝缘子串操作冲击闪络电压的影响

试品为 22 片 195×320mm 绝缘子（无环），图中 100%闪络电压为 1538kV

由图 3-104 可以看出，当 $Y/L=X/L=2.5$ 时，绝缘子串的操作冲击闪络电压已不受横担及塔身的影响，而当 $Y/L=1.0$ 时，受距离 X 的影响不大。由图 3-106 可以看出，门型与倒 L 型的操作冲击闪络电压相差甚小，窗型闪络电压约低 4%左右。

由图 3-111 及图 3-112 所示美国超（特）高压基地对塔头绝缘子串所测试验数据表明，对悬垂绝缘子串，边相的闪络电压比中相约高 11%。对 V 型绝缘子串，则边相比中相仅高 5%，这可能是由于 V 型串受横担及相邻串的影响较大所致。

图 3-113 示出了苏联推荐的塔头空气间隙试验曲线。该曲线所用绝缘子串为 V 型串。由曲线可以看出，门型塔中相及塔窗比门型塔边相（即倒 L 型）的放电电压分别低 3%及 6%左右。

我国原水利电力部电力科学研究院高压研究所及北京电力试验研究所亦对各种塔头布置型式进行过操作冲击干闪试验，其闪络概率与塔头布置的关系见表 3-49 及表 3-50。

表 3-49 原水利电力部电力科学研究院高压研究所所测酒杯真型塔数据

试验用波形		+250/2500					中相：+520/3750 边相：+600/4500
距塔身距离（D）/绝缘子串长（λ）		1.38	1.2	1.1	1.0	0.8	1.38
边相放电电压/中相塔窗放电电压		1.107	1.074	1.062	1.045	1.033	1.035
沿绝缘子串的闪络概率	边相	86%	57%	40%	25%	0%	57%
	中相	70%	46%	35%	20%	0%	90%

注 试品为 28 片 XP－16，绝缘子串总长（λ）约为 4.4m（不包括金具）。

表 3-50 北京电力试验研究所所测数据

试验用波形		+250/2500			
距塔身距离（D）/绝缘子串长（λ）		0.9	0.8	0.7	0.6
放电电压比	门型塔边相/酒杯塔中相塔窗	1.063	1.06	1.055	1.048
	门型塔边相/门型塔中相	1.025	1.025	1.028	1.021

注 绝缘子串为 28 片 XP－16，总长（λ）约为 4.4m（不包括金具）。

以上所列国内、外数据可供设计者参考。在绝缘配合设计时，关注的是塔头部绝缘的耐受电压 U_N，而不是放电电压 $U_{50\%}$。二者差别的大小与标偏系数 σ%

有关。国内外试验均表明，σ%的大小与塔头布置型式有关，见表 3-51。

表 3-51 国内、外试验所得 σ%值

间隙型式	苏联数据	北京电力试验研究所数据	原水利电力部电力科学研究院高压所数据
导线－横担	(7.6)		
倒 L 型（门型塔边相）	(6.6)	5.08	6～10
门型塔中相	(5.8)	4.16	
塔窗	(5.1)	3.93	5.0（3.5）

注 1. 括号外数字为用悬垂绝缘子串时的测试数据，括号内数字为用 V 型串时的测试数据。
2. 苏联为长波头数据，其他为 +250/2500μs 数据。

综上可见，中相塔窗的操作冲击 50%放电电压（$U_{50\%}$）比边相低，但其标偏系数（σ%）也比边相小。因此，中相与边相的耐受电压实际上差别不大。

（2）塔头宽度的影响。塔头宽度对塔头空气间隙的操作冲击击穿电压有一定的影响。图 3-106 绘出了美国的试验数据。苏联则仍按式（3-216）进行操作冲击击穿电压的塔头宽度校正。

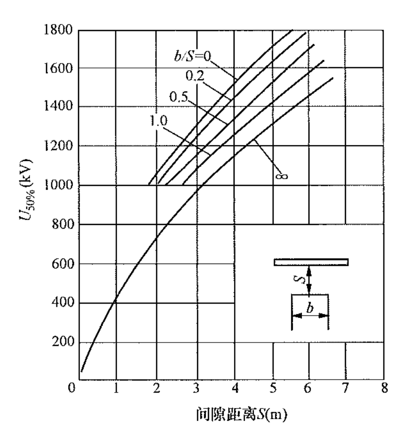


图 3-106 导线对塔身（或横担）空气间隙操作冲击击穿电压曲线（+175/3200μs）
b—塔身（或横担）宽度；S—间隙距离

实际上，当空气间隙距离不同时，塔头宽度的影响也应有所不同，美国的试验数据较明显地反映了这一影响，可作为设计参考。

（3）绝缘子串距横担距离的影响。图 3-107 列出了 +175/3200μs 操作冲击波作用下绝缘子串的悬挂杆（即悬垂绝缘子串与杆塔横担的连接金具）校正曲线，可供设计参考。从国内的一些试验资料来看，试验所用的悬垂绝缘子串与横担连接金具的长度与实际工程所用差别不大，因此，在设计时可不必进行校正。

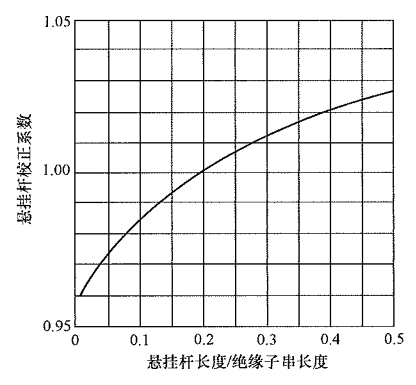


图 3-107 在正极性操作冲击波作用下悬垂绝缘子串的悬挂杆校正曲线（+175/3200μs）

（4）绝缘子串防护金具对塔头绝缘操作冲击放电电压的影响。国外一些试验已证实，绝缘子串防护金具对塔头空气间隙的正极性操作冲击击穿电压的影响，可以简单地按防护金具使空气间隙距离减小（即从防护金具外缘计算间隙距离）来考虑，并可利用没有防护金具时的击穿电压数据。对悬垂绝缘子串，在正极性操作冲击干闪情况下防护金具对闪络电压的影响，应视防护金具相对于绝缘子串安装位置之不同，其影响相当于减少 0～1.5 片绝缘子。

（5）导线根数对塔头空气间隙击穿电压的影响：L·帕里斯曾对单导线及四分裂导线与构架的空气间隙击穿电压进行了对比试验，其情况见表 3-52。

由表 3-52 可以看出，在导线分裂根数不多（如三根、四根）的情况下，导线分裂根数对间隙的击穿电压影响很小，《345 千伏及以上超高压输电线路参考手册》也同样指出了这一点。因此，对这一影响在设计中可不予以校正。

表 3-52 导线－构架间隙击穿电压比较表

被试间隙	波形	间距 S（m）	（1）单导线（m）$U_{50\%}$（kV）	（2）四分裂导线 $U_{50\%}$（kV）	（1）/（2）
（示意图，间距 S）	+120/4000μs、干闪	2	940	960	0.98
		5	1730	(1750)	(0.99)
	+420/4000μs、干闪	2	1020	1020	1.0
		4	1750	1760	0.99

注 1. 括号中的数值为插入值。
2. 单导线直径与四分裂导线中单根子导线直径相等。

（6）塔头离地高度对间隙击穿电压的影响。《345千伏及以上超高压输电线路设计参考手册》列出了不同高度的导线对塔柱的试验结果。结果表明，对塔身宽1.22m、间隙为2.44m的情况，把导线由离地16.8m高度降为4.6m高度时，间隙的击穿电压降低8%左右。这就足以说明塔头离地高度对间隙击穿电压有影响。《超高压送电线路设计》也同样指出了这一点。由于各试验场（所）条件所限，试验高度通常小于正常使用高度，因而其结果偏于安全。考虑到目前有关杆塔高度影响的校正尚无可靠数据，因此可暂不做校正。

（五）悬垂绝缘子串的操作冲击闪络特性

为便于设计使用，现列出国内外的一些试验曲线以供参考。

图3-108为国产X－7型绝缘子串的操作冲击闪络特性。由图可以看出，＋800/5000μs情况下的绝缘子串的干、湿闪络电压与工频基本一致。图3-109为大连产XP－10的闪络特性，它是西安原第一机械工业部高压电器研究所1984年的试验曲线。试验时绝缘子串上端离横担0.8m，下端带P_1－330屏蔽环及分裂间距为400mm的两分裂导线（用长6m的钢管代替）。模拟铁塔吊高约20m，横担长14.1m。图3-110为我国XP－16（155×255mm）及大盘径XP－16D（155×267mm，泄漏距离为325mm，试验时尚未正式定型）绝缘子的操作冲击闪络特性，它是北京电力试验研究所的试验曲线。绝缘子串无防护金具，导线采用上扛线夹。湿试验时的淋雨率为1.5～1.8mm/min（垂直分量）。

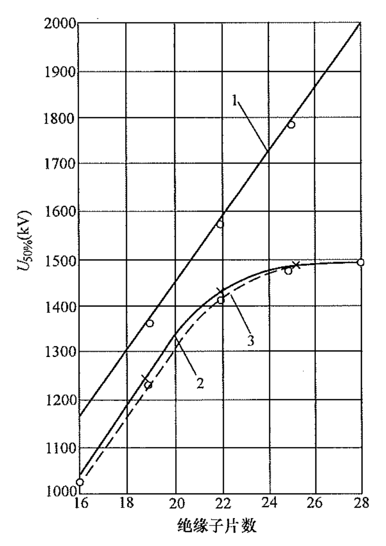


图3-109　XP－10（146×254mm）绝缘子操作及雷电冲击闪络电压曲线

1—＋1.2/50μs，干闪；2—＋310/3300μs，干闪；3—＋310/3300μs湿闪，淋雨率为3mm/min雷电及操作冲击干闪数据已按IEC 60－2：73校正到标准状态，操作冲击湿闪未做校正

图3-111及图3-112为美国超高压试验基地的一组试验曲线，此两图曲线的试验波形为＋175/3200μs，闪络电压的标偏系数（σ%）约为5%。图3-112若用于边相，则$U_{50\%}$应增加11%，如装设均压环，则$U_{50\%}$降低约相当于减少0～1.5片绝缘子。图3-112若用于边相，则绝缘强度增加5%。湿闪使绝缘强度降低5%。如装设均压环，则使绝缘强度降低约5%。

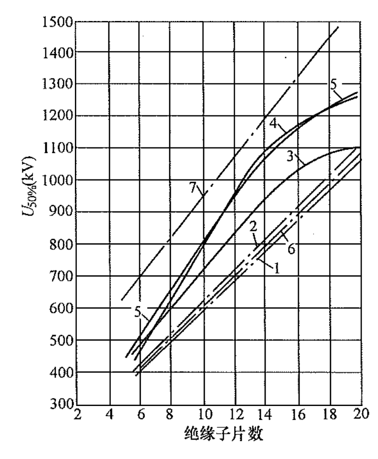


图3-108　X－7（146×254mm）型绝缘子串操作冲击闪络电压曲线

1—800/5000μs，湿闪，正、负极性；2—100/5000μs，湿闪，正、负极性；3—100/5000μs，干闪、正极性；4—800/5000μs，干闪，正极性；5—工频干闪；6—工频湿闪；7—1.5/40μs，正极性

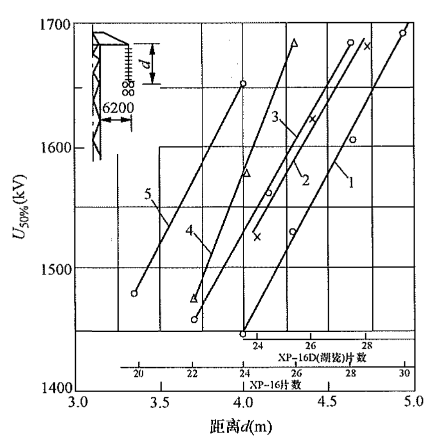


图3-110　XP－16及XP－16D（湖北电瓷厂）绝缘子串操作冲击闪络电压曲线

1—XP－16，湿闪，＋250～290/2800～3300μs；2—XP－16D，湿闪，＋220～270/2900～3000μs；3—XP－16，干闪，＋260/3200μs；4—XP－16，湿闪，＋470～480/3300～3400μs；5—XP－16，干闪，＋480～500/3000～3100μs

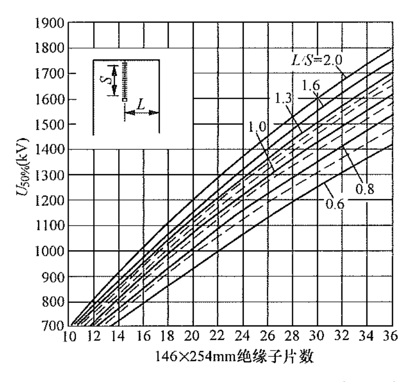


图 3-111 铁塔中相悬垂绝缘子串的正极性操作冲击

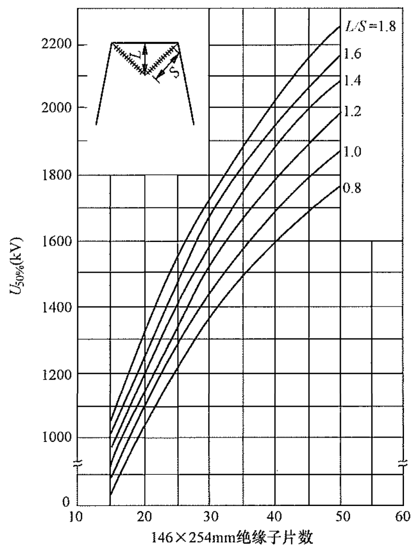


图 3-112 铁塔中相 V 型绝缘子串正极性操作冲击干闪电压曲线

以上所列干闪电压曲线均是短波头的试验数据。图 3-113 列出了一组苏联的长波头数据。图中曲线为

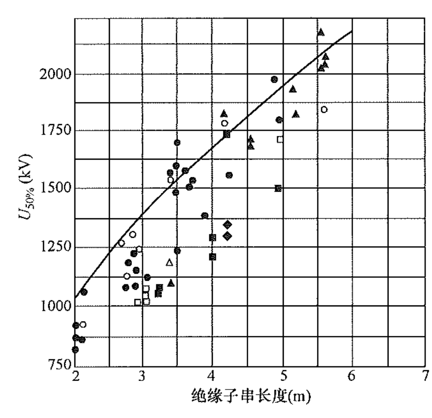


图 3-113 操作冲击电压（等值频率为 125Hz）作用下悬垂绝缘子串的闪络特性

○●—ПМ－4.5（140×270mm）；□■—П－8.5（203×320mm）；△▲—ЛС－30（190×320mm）；◆—П－11（215×350mm）；（白色点表示正极性，黑色表示负极性，曲线为正极性干闪电压）

正极性干闪电压数据，各试验点为湿闪电压数据。湿试验时淋雨率为 3mm/min。

（六）悬垂绝缘子串的操作冲击闪络特性

1. 电网运行情况对悬垂绝缘子串操作污闪的影响

试验表明，绝缘子串的操作污闪特性与工频电压的施加情况有密切关系。为了了解电网不同运行条件下绝缘子串的操作污闪特性，操作污闪的试验方法一般有如下三种：

（1）先不加工频电压，直接加操作冲击电压。这种情况相当于停运之后重新带电运行的湿污秽线路的运行情况。

（2）先加工频电压，然后在断开工频电压后立即施加操作冲击电压。这种情况相当于湿污秽线路自动重合闸的运行情况。

（3）工频电压叠加操作冲击电压。这种情况相当于系统解列及线路弧光接地等的运行情况。

测试表明，先加工频电压比先不加工频电压的操作污闪电压低，这主要是由于工频电压作用时间较长，能在受潮绝缘子表面形成干燥带所致。试验也同时表明，绝缘子串的操作污闪电压随脏污程度的增加而下降。对工频叠加操作冲击电压的情况，其操作污闪电压比清洁绝缘子的操作湿闪电压约低 1/3～1/2。

2. 绝缘子串的操作污闪与工频污闪的关系

国内、外试验均表明，绝缘子串的操作污闪电压和工频污闪电压的比值一般为 2 左右。如果线路的操作过电压倍数在 2 倍左右及以下，则按工频污闪要求选择的绝缘子片数能满足操作冲击作用下的污闪要求。同时，目前我国规程规定的绝缘子工频泄漏比距的要求（见表 3-44）系根据我国线路的大量运行经验而得出的，这自然也包括了污秽绝缘子遭受操作过电压的情况在内。由此两点可以认为，在设计时操作污闪可不作为选择绝缘子片数的条件。

（七）空气间隙的操作冲击击穿特性

为便于设计使用，现列出国内、外的一些试验曲线以供参考。所列曲线均是正极性干击穿电压曲线。

图 3-114～图 3-118 为国内测试的曲线。图 3-115 是几种波形下双分裂导线－水泥杆间隙的操作冲击击穿电压曲线，数据已按 GB 311—1964 校正至标准状态。图 3-116 为西安高压电器研究所的双分裂导线－铁塔间隙操作冲击击穿电压曲线。试验时悬垂绝缘子下端带有分裂间距为 400mm 的双分裂导线及 P1－330 屏蔽环。当间隙较长时，为防止对墙及塔腿放电，则仅有 P1－330 屏蔽环。试验数据已按 IEC 60－1：1973 校正至标准状态。

图 3-116 为北京电力试验研究所的试验曲线，试验厅宽约 30m，被试塔头的横担距试验厅屋顶横梁约 8m，距地约 16m，模拟导线离地约 10m，因此，大地

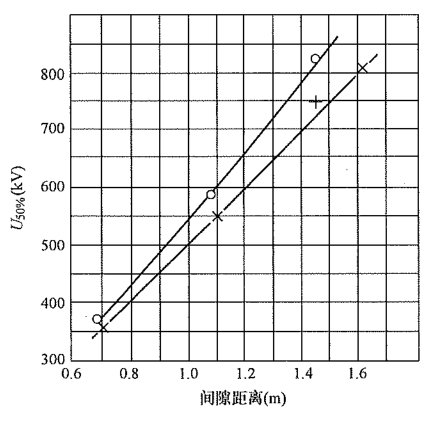


图 3-114　双分裂导线－水泥杆间隙操作冲击击穿电压曲线

○—＋640/3000μs；×—＋88/3000μs；＋—＋400/3000μs

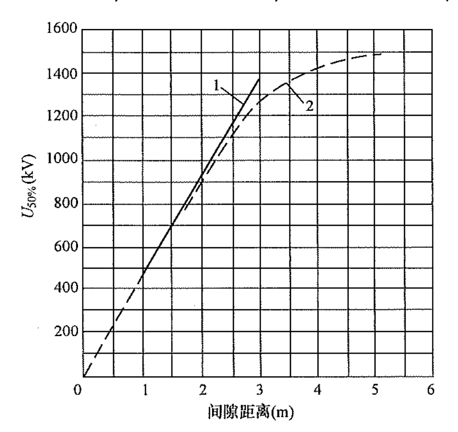


图 3-115　双分裂导线－塔构间隙操作冲击击穿电压曲线（＋310/3300μs）

1—带导线及 P1－330 屏蔽环；

2—带 P1－330 屏蔽环，无导线

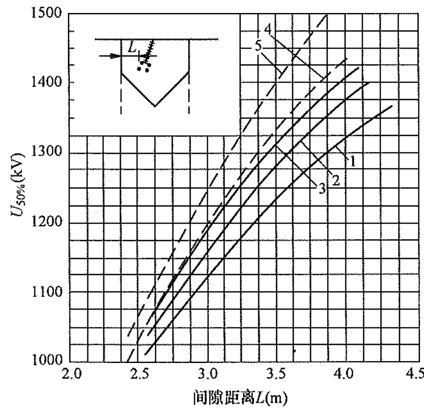


图 3-116　四分裂导线－塔构间隙正极性操作冲击击穿电压曲线

1—塔窗中相，＋240～255/2040～2250μs；2—门型塔中相，＋236～265/2040～2330μs；3—门型塔边相，＋240～250/1980～2200μs；4—门型塔边相，＋250～270/3000～3300μs；5—门型塔边相，＋460～540/3100～3600μs 实线为 1979 年所测，塔身宽约 2－4m。虚线为 1978 年所测，塔身宽约 1.7m。数据已按 IEC 60－1－73 校正

对测试数据有较大的影响，所测数据与图 3-117 相比要偏低一些。另外，图中曲线 3、4 为两次不同时间的测试数据，两曲线的差异可能是由于塔身宽度不同以及其他因素的影响所致。图中数据已按 IEC 60－1－73 校正。

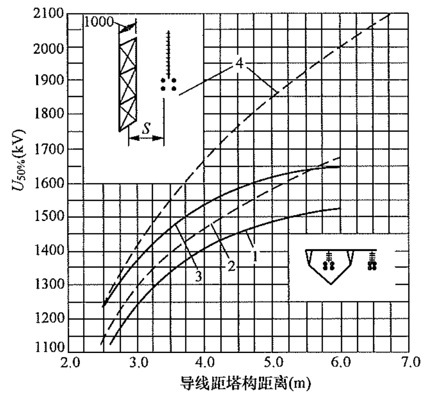


图 3-117　500kV 酒杯塔塔头操作冲击击穿电压曲线

1—酒杯塔中相，＋250/2500μs，σ%＝5.2%～7.25%；

2—酒杯塔边相，＋250/2500μs，σ%＝4.28%～5.76%；

3—酒杯塔中相，＋520/3750μs，σ%＝4.0%～5.48%；

4—导线－立柱间隙，＋250/2500μs

图 3-117 为原水利电力部电力科学研究院高压所在户外试验场的测试数据。被试塔头的横担距地 33m，导线为四分裂导线。试验酒杯塔塔头间隙时，绝缘子串采用 28 片 XP－16，上扛线夹，无均压屏蔽环。

图 3-118 系东北电力试验研究院在二代猫头塔真型塔窗上所做的试验曲线。试验采用了各种波头长度，是国内比较完整的一组曲线。

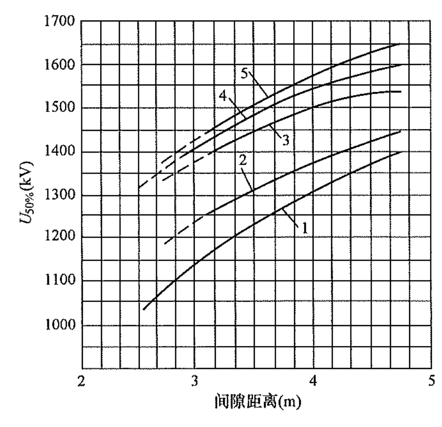


图 3-118　500kV 二代猫头型塔塔窗操作冲击击穿电压曲线

1—＋250/2500μs；2—＋175/2500μs；3—＋500/2500μs；4—＋1000/5400μs；5—＋2000/12000μs 绝缘子串采用 25 片 XP3－16D，上扛线夹，无均压环及屏蔽环，四分裂导线

图 3-106 系引自美国超高压试验基地的一组试验曲线，图 3-119 系引自日本的试验数据，可供设计参考。

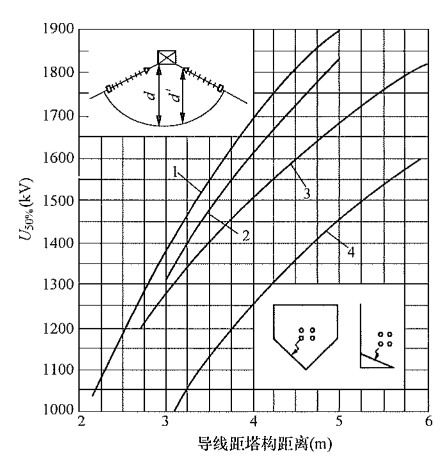


图 3-119 四分裂导线–塔构间隙操作冲击击穿电压曲线（+150/3000μs）

1—棒–棒间隙；2—跳线–横担间隙；3—导线–塔身间隙；4—棒–板间隙

图 3-120 列出一组长波头的试验数据。该曲线所用绝缘子串为 V 型串。在长波头作用下各种空气间隙的 σ%值列入表 3-53。

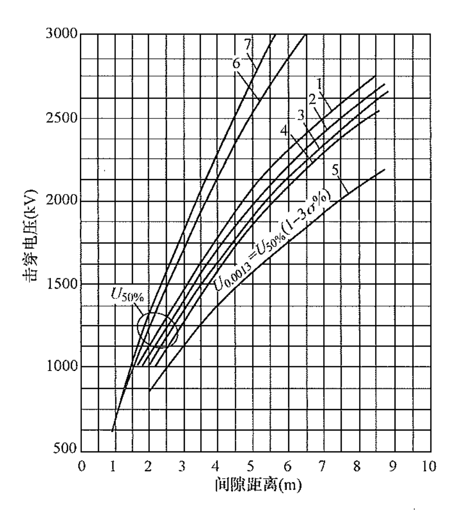


图 3-120 导线–铁塔空气间隙击穿电压曲线

1—导线–横担，操作，正极性；2—导线–横担及立柱，操作，正极性；3—导线–横担及两立柱，操作，正极性；4—导线–塔窗，操作，正极性；5—所有以上（1~4 曲线）间隙，操作，正极性；6—导线–横担及立柱，雷电，正极性；7—导线–横担及立柱，雷电，负极性导线距铁塔所有构件（横担、立柱及下横梁）的距离相等，铁塔断面为 1×1m²

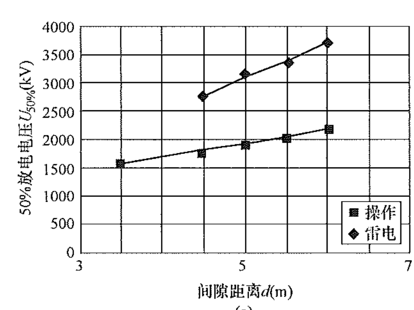
表 3-53 长波头作用下空气间隙的标偏系数（σ%）

间隙型式	σ_t%	σ%
导线–横担	7.6%	7.9%
导线–横担和立柱	6.6%	6.9%
导线–横担和双立杆	5.8%	6.1%
导线处于塔窗内	5.1%	5.5%

注 σ_t%—试验条件下的标偏系数；σ%—气象条件变化影响后的综合标偏系数。

图 3-121、图 3-122 为 750kV 线路的操作和雷电冲击曲线。

图 3-123 为 1000kV 线路的操作冲击曲线。



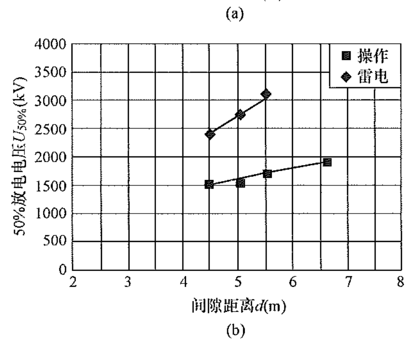


图 3-121 750kV 单回路线路导线对杆塔空气间隙的操作和雷电冲击 50%放电电压

（a）线路边相导线对塔柱；（b）线路中相 V 串导线对杆塔

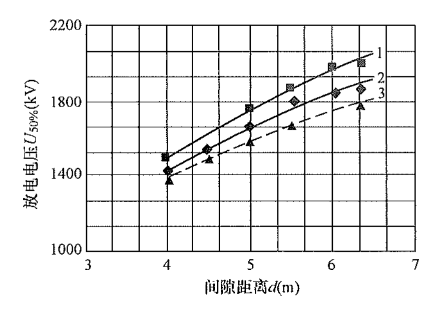
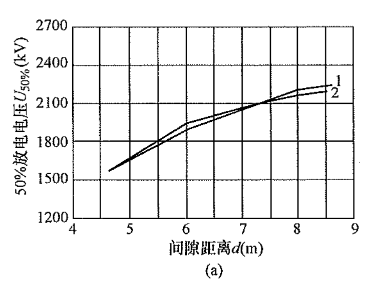
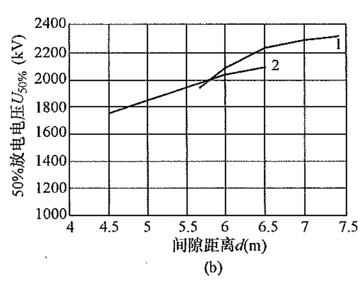


图 3-122 750kV 同双回线路空气间隙的操作冲击 50%放电电压

1—中相波前时间 800μs；2—中相波前时间 250μs；3—下相波前时间 250μs





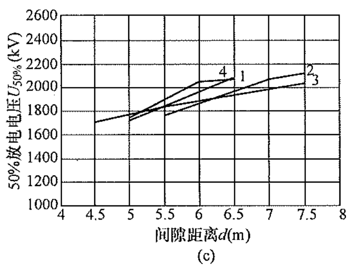


图 3-123 1000kV 导线对塔身的操作冲击（1000μs）50%放电电压曲线

（a）1000kV 单回路导线对塔身的操作冲击（1000μs）50%放电电压曲线

1—1000kV 单回线路猫头塔导线对塔身间隙的操作冲击 50%放电电压曲线；

2—1000kV 单回线路酒杯塔导线对塔身间隙的操作冲击 50%放电电压曲线

（b）1000kV 同塔双回路考虑风偏，杆塔中相对下横担空气间隙操作冲击的 50%放电电压曲线

1—1000kV 同塔双回路考虑风偏，杆塔中相 I 串导线对下横担空气间隙的 1000μs 长波前操作冲击的 50%放电电压曲线；

2—1000kV 同塔双回路考虑风偏，杆塔中相 V 串导体对下横担空气间隙的 1000μs 长波前操作冲击的 50%放电电压曲线

（c）1000kV 同塔双回路中相、下相杆 V 串空气间隙操作冲击的 50%放电电压曲线

1—1000kV 同塔双回路，杆塔中相 V 串导线对塔身空气间隙的 1000μs 长波前操作冲击的 50%放电电压曲线；

2—1000kV 同塔双回路，杆塔中相 V 串导线对中横担空气间隙的 1000μs 长波前操作冲击的 50%放电电压曲线；

3—1000kV 同塔双回路，杆塔下相 V 串导体对横担空气间隙的 1000μs 长波前操作冲击的 50%放电电压曲线；

4—1000kV 同塔双回路，杆塔下相 V 串导体对塔身空气间隙的 1000μs 长波前操作冲击的 50%放电电压曲线

（八）操作过电压作用下并联绝缘的闪络

当线路上出现操作过电压时，操作冲击电压波不止作用在一个绝缘（如一个空气间隙或一串绝缘子，而在实用中则往往把一个塔头看作一个绝缘）上，而是几乎全线绝缘都受到操作冲击电压波的作用。因此，一条线路的闪络跳闸率不但和单个绝缘的闪络概率有关，而且和并联绝缘的数量有关。若假定单个绝缘的闪络概率为 P_i（U_i）时，则有 n 个绝缘的线路的闪络概率为

$$P_n(U)=1-\prod_{i=1}^{n}[1-P_i(U_i)] \qquad (3\text{-}229)$$

下面就两种情况进行分析。

1. 假定操作过电压沿线路（即沿 n 个绝缘）均匀分布的情况

当线路全线（设有 n 个绝缘）的绝缘水平都相等，而且加于全线 n 个绝缘上的操作过电压幅值均相等（即均匀分布）时，式（3-229）可变为

$$P_n(U)=1-[1-P_1(U_1)]^n \qquad (3\text{-}230)$$

按式（3-230），并假定单个绝缘及 n 个并联绝缘的放电概率均服从正态分布，则可推算出在一定的耐压概率下并联绝缘的耐压值与单个绝缘的耐压值之间的关系，如图 3-124 所示。设计时，用图 3-124 的曲线和单个绝缘的试验数据，就可以根据线路（n 个并联绝缘）的耐受概率确定线路的耐压水平。

由图 3-124 可以看出，随着线路并联绝缘数量的增加，线路的耐压水平降低。与此同时，经计算表明，随着并联绝缘数量 n 的增加，其放电电压的分散性（即标准偏差 σ_n）也减小，如式（3-231）及表 3-54 所示。

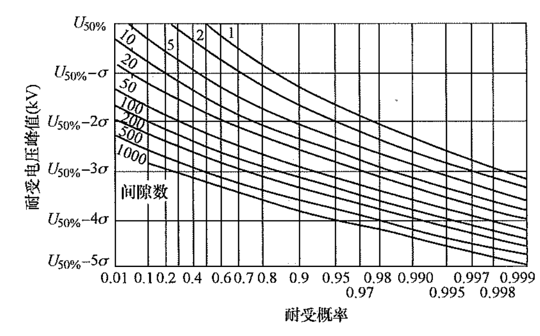


图 3-124 并联间隙使耐受电压降低的换算图

$U_{50\%}$—单个间隙的 50%闪络电压，kV；

σ—单个间隙的标准偏差，kV

表 3-54 并联间隙数（n）与 σ_n/σ_1 的关系

n	1	2	4	10	20	50
σ_n/σ_1	1	0.81	0.7	0.6	0.54	0.47
n	100	200	500	1000	10000	
σ_n/σ_1	0.42	0.38	0.35	0.33	0.28	

$$\frac{\sigma_n}{\sigma_1}=\frac{1}{n}\times 0.5\left(\frac{1}{n}\right)^{-1}\times\exp\left[\frac{(U_{50\%n}-U_{50\%1})^2}{2\sigma_1^2}\right] \qquad (3\text{-}231)$$

式中 σ_1——1 个绝缘放电电压的标准偏差，kV；

σ_n——n 个并联绝缘放电电压的标准偏差，kV；

$U_{50\%1}$——1 个绝缘的 50%放电电压，kV；

$U_{50\%n}$——n 个并联绝缘的 50%放电电压，kV。

2. 操作过电压沿线（即沿 n 个绝缘）不均匀分布的情况

实际上，当操作冲击波施加于线路上时，每个杆塔（可看成每个绝缘）所承受的过电压幅值及其标偏均不相等（见图 3-95 和图 3-96），因此，假定过电压幅值沿线均匀分布来计算线路的闪络概率（或耐压水平）是不正确的。正确的做法只能按各塔实际承受的过电压幅值及其标偏逐塔计算各塔的闪络概率，并应用式（3-229）来计算整个线路（设共有 n 个绝缘）的闪络概率。不过，这样计算不但非常麻烦，而且也不可能准确掌握各塔上过电压分布的确切规律。为了能比较切合实际并使计算简化，目前各国在粗略计算中均采用了等值塔数 n_{eq} 的概念。

所谓等值塔数 n_{eq}，就是假定以线路上最大过电压的幅值及其标偏均匀施加在 n_{eq} 基杆塔上，使其按式(3-230)计算出的线路闪络概率 $P_{n_{eq}}(U)$ 等于按实际过电压不均匀分布用式（3-229）算出的闪络概率 $P_n(U)$。这样，令式（3-229）算出的 $P_n(U)$ 等于按式（3-230）算出的 $P_{n_{eq}}(U)$，即可得 n_{eq} 为

$$n_{eq}=\frac{\lg\left[1-P_n(U)\right]}{\lg\left[1-P_1(U_1)\right]} \tag{3-232}$$

n_{eq} 值的大小与沿线过电压及其标偏的分布有关。苏联根据 220kV 和 500kV 线路自动重合闸过电压及其标偏的沿线实际分布，推算出 n_{eq}=80～150，建议取 n_{eq}=100。原水利电力部电力科学研究院高压研究所曾对 500kV 线路进行过合闸及重合闸内过电压模拟测试。经测试及计算，推算出 n_{eq}=100～170，建议取 n_{eq}=120。

综上所述，对 220kV 及以上线路进行操作过电压闪络概率粗略计算时，建议取 n_{eq}=100～120。

（九）操作过电压作用下绝缘子片数的选择

绝缘子串中绝缘子片数的选择除应符合相应现场污秽度等级下耐受持续运行电压的要求见式（3-218）外，尚应符合操作过电压的要求，其选择方法如下。

（1）电压较低的线路，当绝缘子串缺乏合适的操作冲击闪络电压数据时，可用工频湿闪络电压数据作为选择依据。此时，绝缘子串的工频 50%湿闪络电压峰值 U_{Nh} 应满足下式要求。

$$U_{Nh}=KK_0\sqrt{2}\,2U_{pm} \tag{3-233}$$

式中 K_0——操作过电压倍数，可按规程或线路实测数据选取；

K——由工频与操作冲击电压差别等因素而引入的湿闪络电压综合校正系数。在海拔 1000m 及以下，K=1.1；

U_{pm}——线路的最高运行相电压有效值，kV。

（2）按绝缘子串的操作冲击闪络电压数据选择绝缘子片数。操作过电压要求的线路绝缘子串正极性操作冲击电压波 50%放电电压 $U_{50\%}$应符合下式要求：

$$U_{50\%}\geqslant K_1U_s \tag{3-234}$$

式中 U_s——220kV 以上线路相对地统计操作过电压按 GB/T 50064—2014 第 4.2.1 条 4 款选取，kV；

K_1——线路绝缘子串操作过电压统计配合系数，按 GB/T 50064—2014 第 6.2.1 条 2 款取 1.27。

（3）关于零值绝缘子的考虑。绝缘子在运行中，由于制造质量不良及老化等原因可能出现零值。当绝缘子串中出现零值绝缘子后，对其操作冲击闪络电压有无影响，目前尚有不同的看法。国外有资料介绍，长串绝缘子中有个别零值绝缘子，对其操作冲击闪络电压没有明显影响。北京电力试验研究所对 500kV 长绝缘子串进行操作冲击湿闪络电压的试验表明，长绝缘子串中出现两片零值绝缘子，能使绝缘子串的操作冲击湿闪络电压降低，其降低程度相当于减少 1 片多绝缘子。基于所述情况，并结合 GB 50545—2010 及 GB 50061—2010 的规定，建议对各级电压线路，当按式（3-233）、式（3-234）选择绝缘子片数后，尚应再增加 1～2 片绝缘子以补偿出现零值绝缘子的影响。

（十）操作过电压空气间隙

导线在操作过电压所规定的相应风速作用下产生风偏后，对杆塔构件的最小空气间隙距离可按以下公式选取。

（1）电压较低的线路，当缺乏合适的空气间隙操作冲击击穿电压数据时，可用工频击穿电压数据作为选择依据。此时，塔头空气间隙的工频 50%击穿电压（最大值）U_{Nm} 应满足下式要求

$$U_{Nm}=K_2K_0\sqrt{2}\,U_{pm} \tag{3-235}$$

式中 K_2——由工频与操作冲击电压差别等因素而引入的击穿电压综合校正系数，在海拔 1000m 及以下，K_2=1.2；

K_0、U_{pm} 的符号含义同式（3-233）。

（2）按空气间隙的操作冲击击穿电压数据选择塔头空气间隙距离。此时，塔头空气间隙的操作冲击 50%击穿电压峰值 U_{sua} 应满足下式要求

$$U_{sua}=KK_0\sqrt{2}U_{pm} \tag{3-236}$$

式中 K——线路空气间隙操作过电压统计配合系数。

K_0、U_{pm} 的符号意义同式（3-233）。

根据 GB 50064—2014 规定，线路空气间隙操作

过电压统计配合系数。对单回线路可取 1.1；对同塔双回线路，无风时上、中导线对中、下横担空气间隙正极性操作冲击 50%放电电压的统计配合系数可取 1.27；风偏后，三相导线对塔身或横担空气间隙的统计配合系数可取 1.1。

根据式（3-236）计算出的 U_{sua} 值查相应的曲线，即可得所需塔头操作过电压空气间隙的数值。

（3）GB 50545—2010 等规程对各级电压线路所需最小空气间隙距离做了规定，现将其归纳整理，见表 3-55～表 3－58。

表 3-55　110～500kV 带电部分与杆塔构件的最小间隙　m

标称电压（kV）	35	66	110	220	330	500	
工频电压	0.1	0.2	0.25	0.55	0.90	1.20	1.30
操作过电压	0.25	0.50	0.70	1.45	1.95	2.50	2.70
雷电过电压	0.45	0.65	1.00	1.9	2.30	3.30	3.30

注　1. 按雷电过电压和操作过电压情况校验间隙时的相应气象条件。
2. 按运行电压情况校验间隙时风速采用基本风速修正至相应导线平均高度处的值及相应气温。
3. 500kV 空气间隙栏，左侧数据适合于海拔不超过 500m 地区；右侧是用于超过 500m 但不超过 1000m 的地区。

表 3-56　750kV 带电部分与杆塔构件的最小间隙　m

标称电压（kV）		750	
海拔（m）		500	1000
工频电压	I 串	2.25	2.40
操作过电压	边相 I 串	3.30	3.45
	中相 V 串	5.05	5.30
雷电过电压		4.20（或按绝缘子串放电电压的 0.80 配合）	

注　1. 按雷电过电压和操作过电压情况校验间隙时的相应气象条件。
2. 按运行电压情况校验间隙时风速采用基本风速修正至相应导线平均高度处的值及相应气温。
3. 只适用单回路。

表 3-57　1000kV 单回路带电部分与杆塔构件的最小间隙　m

标称电压（kV）		1000		
海拔（m）		500	1000	1500
工频电压		2.7	2.9	3.1
操作过电压	边相 I 串	5.6	6.0	6.4
	中相 V 型串	6.7（7.9）	7.2（8.0）	7.7（8.1）
雷电过电压		暂不予规定		

注　括号内数值为对上横担最小间隙值。

表 3-58　1000kV 双回路带电部分与杆塔构件的最小间隙　m

标称电压（kV）	1000		
海拔（m）	500	1000	1500
工频电压	2.7	2.9	3.1
操作过电压	6.0	6.2	6.4
雷电过电压	6.7	7.1	7.6

注　最小间隙值为 I 串数据。

（十一）带电作业间隙

根据 GB 50545—2010 及 GB 50061—2010，对需要带电作业的杆塔，应考虑带电作业所需的安全空气间隙距离。由于带电作业的方式是灵活多样的，根据多年的设计及运行经验，在一般情况下不会也不宜因考虑带电作业而增大塔头尺寸。不过，在设计中应尽可能从塔头结构及构件布置上为带电作业创造方便条件。

根据 DL 409—1991 的规定："带电作业应在天气良好的条件下进行……雷电时应停止工作。"这就是说，在雷雨（即雷电过电压）条件下是不允许进行带电作业的。因此，带电作业所需空气间隙距离仅由操作过电压来确定。至于远方雷击线路的情况，由于雷电波沿导线传播至作业点时产生衰减，因此也不起控制作用。

直线塔带电作业方式一般有如下三种。

（1）地电位作业方式，即人站在杆塔上（处于地电位），用绝缘工具对带电体进行操作。

（2）等电位作业方式，即人与大地绝缘，处于与带电体相同电位下进行操作。

（3）中间电位作业方式，即用绝缘梯或吊篮等，使人处于带电体与地（或杆塔）之间的某一中间电位，然后用绝缘工具对带电体进行作业。

由于 110kV 及以下线路的塔头间隙较小，一般采用地电位作业方式。220kV 及 330kV 线路，一般可以采用地电位或等电位作业方式。500kV 及以上线路，除可以采用前两种作业方式外，由于塔头间隙距离较大，地电位作业所需绝缘工具太长，操作不便，也可以采用中间电位作业方式。

GB 50545—2010 及 GB 50061—2010 及 GB 50665—2010 规定了带电作业所需的间隙距离，见表3-59～表3-61。

表 3-59　带电作业安全间隙距离

标称电压（kV）	35	66	110	220	330	500	750
校验间隙（m）	0.6	0.7	1.00	1.80	2.20	3.20	4.00*/4.30（边相 I 串/中相 V 串）

* 750kV 单回路带电作业间隙值。

表 3-60　1000kV 单回路带电作业时带电部分对杆塔接地部分的校验间隙　m

海拔	500	1000	1500
中相 V 串校验间隙	6.2	6.7	7.2
边相 I 串校验间隙	5.6	6.0	6.4

表 3-61　1000kV 双回路带电作业时带电部分对杆塔接地部分的校验间隙　m

海拔	0	500
对塔身校验间隙	5.2	5.5
对下侧横担校验间隙	5.4	5.7
对顶部构架校验间隙	6.5	6.8

上述各表所列距离不包括人体及其活动范围。对地电位工作人员停留工作的部位，尚应考虑 0.5m 的人体及其活动范围。对等电位作业人员的人体及其活动范围，应视人体在带电体上的部位（包括人进入带电体的方式）灵活考虑。

根据规程规定，检验带电作业间隙时的计算风速采用 10m/s（相应气温为＋15℃），因此，以上所列间隙距离指考虑导线风偏后所应满足的净距。根据大量带电检修工作的经验，在间隙不足时可采用将带电导线撑开的办法，或在有风天作业时人位于反风向侧作业的办法等来人为的增大间隙距离。因此，在设计时，在征得有关单位同意后，亦可按导线无风偏的位置来计算带电作业所需的间隙距离。

（十二）操作过电压作用下线路跳闸率的简化统计计算法

操作过电压下架空输电线路的空气间隙是按统计法选择的。线路跳闸率的简化统计计算法参见 GB 50064—2014，以下对空气间隙简称为绝缘。单个绝缘在幅值为 u 的操作过电压作用下发生闪络的概率 $P(u)$为

$$P(u)=\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_f^2}}\int_{-\infty}^{u}e^{-\frac{(u-\bar{u}_f)^2}{2\sigma_f^2}}du \tag{3-237}$$

式中　$\bar{u}_f$ ——单个绝缘在操作冲击电压波下的 50% 放电电压；

σ_f ——单个绝缘放电电压的标准偏差。

如线路上操作过电压服从正态分布，且其均值及标准偏差分别为 $\bar{u}_0$ 及 σ_0，那么在一次操作中幅值为 u 与 $u+du$ 间的过电压出现的概率为

$$f(u)du=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0}e^{-\frac{(u-\bar{u}_0)^2}{2\sigma_0^2}}du \tag{3-238}$$

于是受到操作过电压分布整体作用的单个绝缘闪络概率 P_s 为

$$P_s=\frac{1}{2}\int_{0}^{\infty}F(u)p(u)du \tag{3-239}$$

式中的 1/2 为忽略负极性操作过电压的闪络引入。经计算由式（3-239）得

$$P_s=\frac{1}{2}\times\left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{\infty}^{\lambda}e^{-\frac{1}{2}u^2}du\right) \tag{3-240}$$

式（3-240）括号内为正态概率积分函数，可由数表查出，其中标准变量 λ' 为

$$\lambda'=\frac{\bar{u}_0-\bar{u}_f}{\sqrt{\sigma_0^2+\sigma_f^2}} \tag{3-241}$$

如令 K 为操作过电压统计配合系数，且

$$K=\frac{\bar{u}_f}{U_0} \tag{3-242}$$

式中：$U_0=\bar{u}_0\left(1+2.05\frac{\sigma_0}{\bar{u}_0}\right)$，为统计操作过电压。

那么 λ'也可由下式算得

$$\lambda'=\frac{1-K\left(1+2.05\frac{\sigma_0}{\bar{u}_0}\right)}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{\bar{u}_0}\right)^2+\left[K\left(1+2.05\frac{\sigma_0}{\bar{u}_0}\right)\times\frac{\sigma_f}{\bar{u}_f}\right]}} \tag{3-243}$$

受到同一操作过电压作用的 N 个绝缘的闪络概率 P_z' 为

$$P_z'\approx 1-(1-P_s)^N \tag{3-244}$$

【例 3－6】 1000kV 线路全长 400km，档距长度 500m。线路上最高的统计操作过电压为 1.7p.u.。该过电压占全线 1/2，且服从正态分布，标准偏差 $\sigma_0=0.12u_0$。线路中相绝缘子为 V 型串、两边相为 I 串。计算线路中相导线对杆塔空气间隙的闪络放电概率。绝缘总数 $Z=400$。$\sigma_f=0.05\bar{u}_f$。

计算过程及结果示于表 3-62。

表 3-62　1000kV 线路中相空气间隙在操作过电压下的闪络概率

操作过电压	倍数（1.0p.u. $=\sqrt{2}U_m/\sqrt{3}$）	1.7		
	统计过电压 U_0（kV）	1527		
	变差系数 $\frac{\sigma_0}{u_0}$	0.12		
	空气间隙 50%放电电压 u_f（kV）	1909	1832	1680
	放电电压变异系数 $\frac{\sigma_f}{\overline{u}_f}$	0.05		
统计配合系数	$K=\frac{\overline{u}_f}{U_0}$	1.25	1.20	1.10
标准化变量 λ'		−3.897	−3.503	−2.682
单个绝缘闪络概率 P_s（$\times10^{-3}$）		0.0243	0.152	1.831
多个绝缘闪络概率 P'_Z		0.00969	0.045	0.520

五、雷电过电压下绝缘配合设计

（一）雷电过电压及其对线路绝缘的影响

1. 线路的雷击事故及雷电流的特征

当雷击线路时，巨大的雷电流在线路对地阻抗上产生很高的电位降落，从而导致绝缘闪络。另外，当雷击线路附近的地面时，由于雷电流引起附近电场及磁场发生强烈突变，使线路上感应出高电压，也会使35kV及以下线路的绝缘发生闪络。因此，雷电造成线路绝缘闪络事故的原因，主要是巨大的雷电冲击电流。

实测表明，在对地的雷电放电中，90%左右的雷是负极性的。雷电流的波形具有冲击波的形式，其波形参数（幅值、波头长度、波长等）具有统计特性。据统计，其波头长度约 0.5～10μs，多数为 1.5～2μs。波长约 20～90μs，但大于 50μs 的很少。雷电流幅值最大可达 200kA 以上，但多数低于 100kA。雷电流陡度超过 7.5kA/μs 的约占一半。

由于雷电流具有冲击波的形式，故由雷闪引起的高电压也具有冲击波的形式。

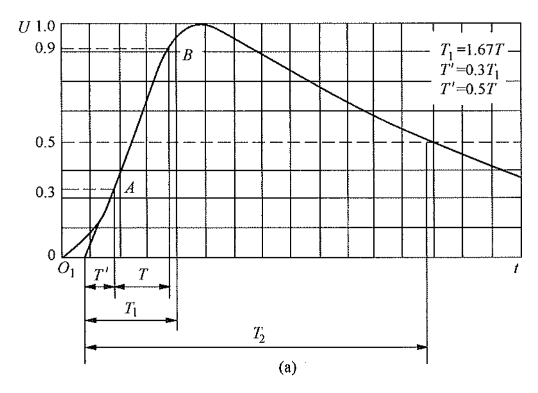
2. 试验用雷电冲击电压的标准波形

为了研究雷电冲击电压作用下线路绝缘的闪络特性，需模拟雷电冲击电压的波形。为此，各国均规定了标准的雷电冲击全波波形，其形状如图 3-125（a）所示。同时，还规定了雷电冲击截波，其截断时刻可以发生在波头、波峰或波尾，如图 3-125（b）、（c）所示。另外，亦可采用斜角波，如图 3-103（c）所示。

GB 311.1—2012 规定的标准雷电冲击全波的视在波头长度 $T_1=1.2\mu s$，视在半峰值时间（即波长）$T_2=50\mu s$，表示为 1.2/50。

对于雷电冲击截波，GB 311.1—2012 规定，经过 2～5μs 后被外部间隙截断的标准冲击波称为标准雷电截波。

试验用雷电冲击电压波除了用视在波头长度（T_1）和视在半峰值时间（T_2）表示外，还应标出其极性（即不接地电极相对于地而言的极性），如±1.2/50μs 等。



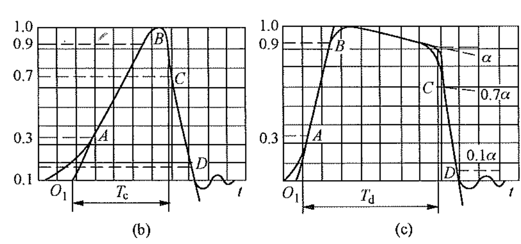


图 3-125　试验用雷电冲击电压波波形图

（a）雷电冲击全波；（b）波前截断的雷电冲击电压波；（c）波尾截断的雷电冲击电压波

T_1—视在波头长度（亦称视在波前时间）；

T_2—视在半峰值时间；T_c—截断时间

3. 雷电冲击 50%闪络电压与伏秒特性

在雷电冲击电压作用下，线路绝缘的闪络电压比直流或工频交流持续作用下的闪络电压要高，这是因为整个闪络发展的过程不仅需要有足够高的电压幅值，还需要有一定的电压作用时间。所以，绝缘的闪络特性和外加的冲击电压的波形有关。通常都采用标准的雷电冲击波来评定绝缘的冲击特性。

绝缘的雷电冲击特性一般用其 50%闪络电压、耐受电压或其伏秒特性来表示。

和绝缘的操作冲击闪络特性一样，雷电冲击的 50%闪络（或击穿）电压 $U_{50\%}$，是指闪络（或击穿）概率为 50%的电压值。它适用于自恢复绝缘、闪络电压符合正态分布的情况。线路绝缘（包括空气间隙和绝缘子串）一般都用这一参数来表征。

耐受电压 U_R 是指对应于某一耐受概率 P_R（如 $P_R=90\%$等）的电压，一般由 $U_{50\%}$和其标准偏差 σ 计算得到（如 $U_R=U_{50\%}-n\sigma$），或按一定的试验方法得到。

由于绝缘的闪络特性与施加电压的持续时间有关，而雷电冲击电压波的持续时间甚短，所以只用 $U_{50\%}$ 来表征绝缘的冲击特性是不够的，有时还需要考虑绝缘的雷电冲击伏秒特性。所谓伏秒特性是指绝缘的闪络电压与作用电压截断时间的关系曲线。伏秒特性对于比较不同设备绝缘的冲击闪络（或击穿）特性具有重要意义。如保护设备的伏秒特性应比被保护设备的伏秒特性低一些、平坦一些，这样才能在任何电压作用的时间下，对被保护设备起到保护作用。

标准波伏秒特性如图 3-126 中曲线 A 所示。由于放电时间具有分散性，每级电压下可能得一系列的放电时间，所以，伏秒特性实际上是以上、下包络线为界的一个带状区域。

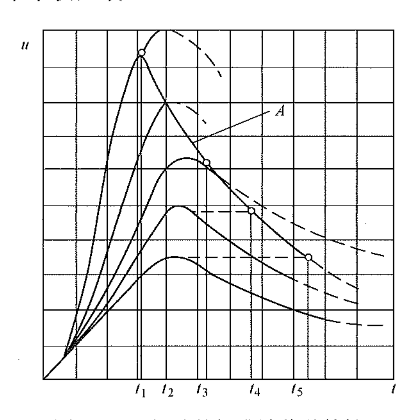


图 3-126 间隙的标准波伏秒特性

4. 绝缘在雷电冲击作用下的极性效应及电极形状的影响

图 3-127 示出了棒－棒、棒－板间隙承受雷电冲击电压时的击穿电压曲线。

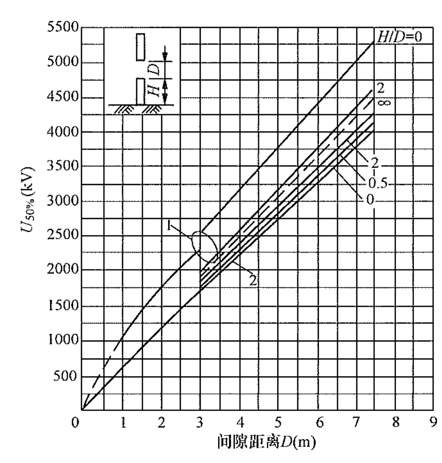


图 3-127 棒－棒、棒－板间隙雷电干冲击击穿电压曲线

1—负极性；2—正极性

注：1.5/40μs 冲击波；大气压力：1.013×10^5Pa；蒸汽压力：2.06×10^3Pa；雨仅有可忽略的影响；图中负极性 H/D=0 曲线在 3.0m 处断开系取自不同资料。

将图 3-128 与图 3-97 操作波作用下的曲线相比可以看出：

（1）任何间隙的雷电冲击击穿电压与操作波作用下一样，都是正极性比负极性低。

（2）间隙的雷电冲击正、负极性击穿电压的差别比操作波情况下的小。

（3）特别在正极性雷电冲击波作用下，邻近接地板对击穿电压的影响比操作波情况下的小。电极形状对击穿电压的影响也比操作波情况下的小。

（4）雷电冲击击穿电压与间隙距离基本上呈线性关系，这在正极性冲击波作用下尤为明显，没有出现如操作波作用下的那种饱和现象。

（二）各类空气间隙的雷电冲击击穿特性

由以上所述可知，在雷电冲击电压作用下，间隙的正极性击穿电压低于负极性。同时，考虑到 90%以上的直击雷是负极性的，当雷击塔顶及避雷线时，相当于在导线上施加正极性雷电冲击电压，所以，线路塔头空气间隙的选取，应采用正极性雷电冲击击穿电压的数据。

试验表明，降雨对空气间隙的雷电冲击击穿电压实际上没有影响，所以，以下所列曲线都是干闪情况下的数据。

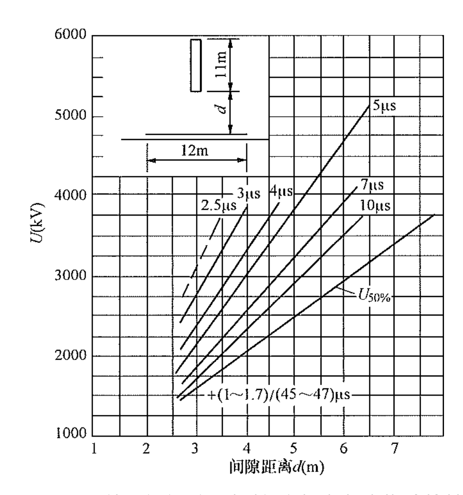


图 3-128 棒－板间隙正极性雷电冲击波伏秒特性

图 3-128 及图 3-129 绘出了典型的棒－板、棒－棒间隙正极性雷电冲击波的伏秒特性曲线。图中各曲线所标注的放电时间（如 2μs、7μs 等）系指击穿时放电时间小于或大于所标注放电时间的概率各为 50%。由图可以看出，棒－棒、棒－板的 50%击穿电压（$U_{50\%}$）在正极性时差别不大（在负极性时差别较大）。因此，在设计中若无恰当的试验曲线可资利用时，亦可根据拟选间隙的电极形状，选用这组曲线中的棒－棒或棒－板曲线或其中间值。

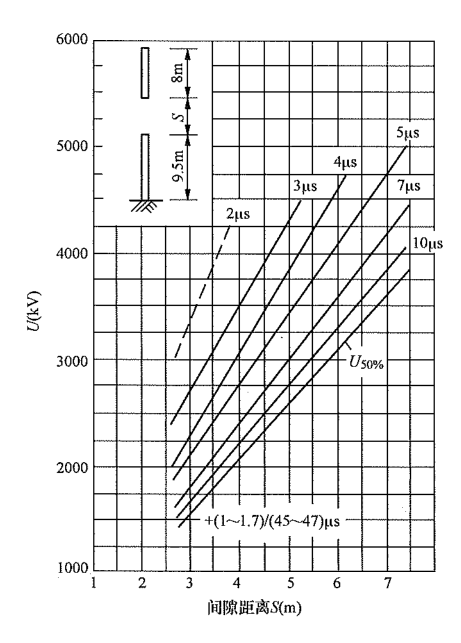


图 3-129 棒－棒间隙正极性雷电冲击波伏秒特性

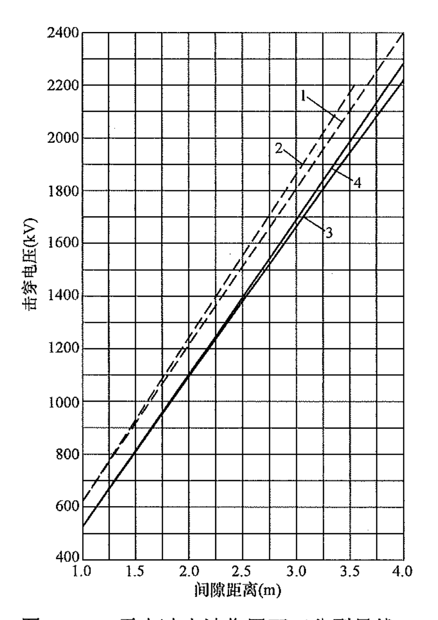


图 3-131 雷电冲击波作用下双分裂导线－门型塔构间隙击穿电压曲线

1—导线－横梁，负极性；2—导线－杆塔支柱，负极性；3—导线－杆塔支柱，正极性；4—导线－横梁，正极性曲线，已按GB 311—64 校正至标准状态，导线为双分裂导线，分裂间距 300mm

图 3-130 是小间隙距离下的试验数据。图 3-131 系根据原第一机械工业部高压电器研究所的试验数据。图 3-132 是原水利电力部电力科学研究院高压研究所及北京电力试验研究所为 500kV 线路所测数据。图 3-133 列出了一组日本的试验数据。由图可以看出，非直线塔跳线（即引流线）间隙的雷电冲击击穿电压比直线塔低。

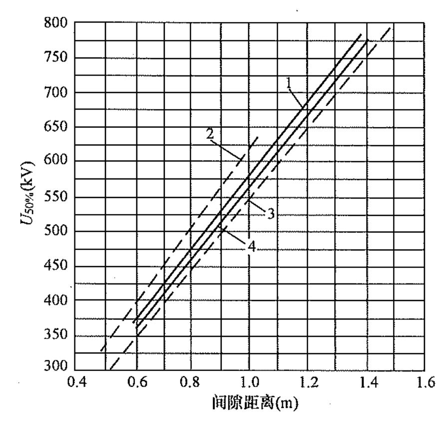


图 3-130 正极性雷电冲击波作用下导线－水泥杆间隙击穿电压曲线

1—导线－斜拉杆；2—棒－棒；3—棒－板；4—导线－水泥杆

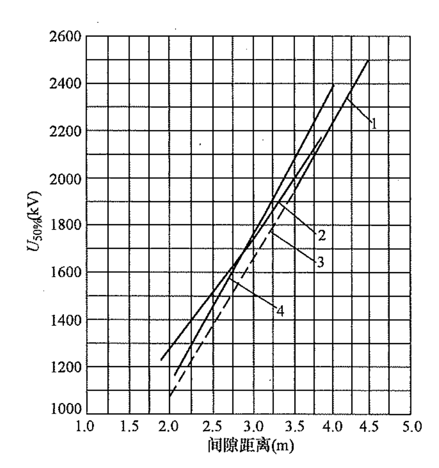


图 3-132 四分裂导线－塔构间隙雷电冲击击穿电压曲线（+1.5/40μs）

1—门型塔边相（北京电力试验研究所）；2—500kV 二代酒杯塔中相；3—500kV 二代酒杯塔边相；4—500kV 一代酒杯塔中相曲线 2～4 为原水利电力部电力科学研究院高压研究所曲线

由于空气间隙的雷电冲击击穿电压的分散性小，故其标偏系数（σ%）可取为 3%，也可根据试验数据选取。

图 3-134、图 3-135 是 750kV 和 1000kV 空气间隙雷电冲击 50%放电曲线。

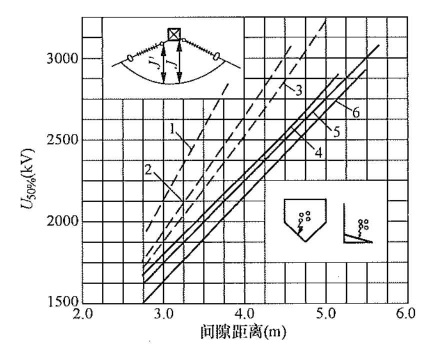


图 3-133　四分裂导线－塔构（跳线）间隙雷电冲击击穿电压曲线

1—导线－塔构间隙，－2/10μs；2—导线－塔构间隙，＋2/10μs；3—跳线－横担间隙，＋2/10μs；4—导线－塔构间隙，－1.5/40μs；5—棒－棒间隙，＋1.5/40μs；6—导线－塔构间隙，＋1.5/40μs

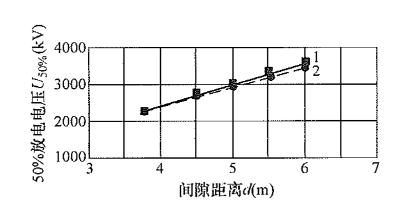
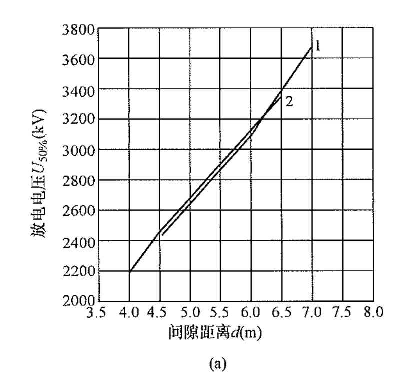


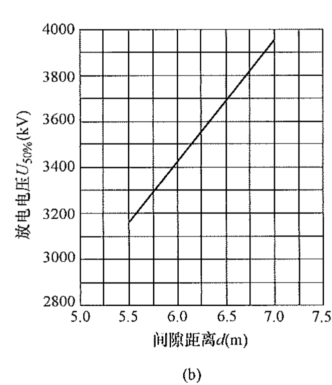
图 3-134　750kV 同塔双回线路空气间隙的雷电冲击 50%放电电压

1—中相；2—下相

（三）绝缘子串的雷电冲击闪络特性

测试表明，绝缘子串的正极性雷电冲击闪络电压比负极性低，所以，当按雷击杆塔来选择绝缘子片数时，应如选择空气间隙一样，采用正极性雷电冲击闪络的数据。





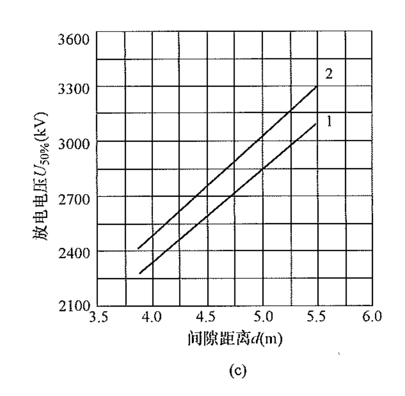


图 3-135　1000kV 空气间隙雷电冲击 50%放电电压曲线

（a）1000kV 单回线路空气间隙的雷电冲击 50%放电电压曲线

1—1000kV 单回线路猫头塔边相空气间隙的雷电冲击 50%放电电压曲线；

2—1000kV 单回线路酒杯塔边相空气间隙的雷电冲击 50%放电电压曲线

（b）1000kV 同塔双回路，杆塔 I 串中相对下横担空气间隙雷电冲击 50%放电电压曲线

（c）1000kV 同塔双回路，杆塔 V 串中相对下横担空气间隙的正负雷电冲击 50%放电电压曲线

1—正极性；2—负极性

除了在负极性试验中大雨沿瓷件结构流下的情况外，降雨对绝缘子串的雷电冲击闪络电压的影响很小，可以忽略不计，所以，以下所列均是干闪情况下的曲线。

图 3-136 及图 3-137 系摘自《超高压输电线路》的一组数据。图 3-136 系摘自 1958 年沈阳变压器厂试验数据。图 3-138 及图 3-139 系分别摘自原第一机械工业部高压电器研究所 1967 年及 1984 年试验数据。图 3-140 则摘自原水利电力部电力科学研究院高压研究所（1981 年）及北京电力试验研究所（1978 年）的试验数据。所列这些曲线均可供设计参考。

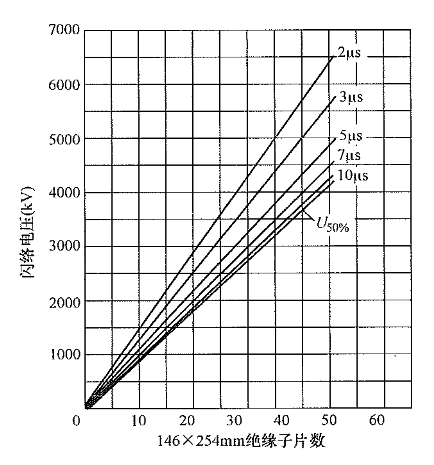


图 3-136　长绝缘子串正极性雷电冲击闪络电压曲线

（在绝缘子串导线端加＋1.5/40μs 冲击波）

根据大量试验可以看出，绝缘子串的雷电冲击闪络电压和绝缘子型式关系不大而主要决定于串长。另外，绝缘子串的雷电冲击闪络电压的分散性也比较小，故其标偏系数 σ%一般可取为 3%，也可根据试验数据选取。

清华大学、西安交通大学合编的《高电压绝缘》（1980 年出版）列出了湿污秽绝缘子串在工频叠加雷电冲击波作用下的试验结果。由所列数据可以看出，绝缘子串在脏污条件下的雷电冲击闪络电压比清洁状态下可降低 15%～35%。不过，考虑到造成污闪的不利气象条件（如雾、露、毛毛雨等）和雷电同时出现的可能性甚少，因此，雷电冲击污闪不应作为选择绝缘子片数的条件。

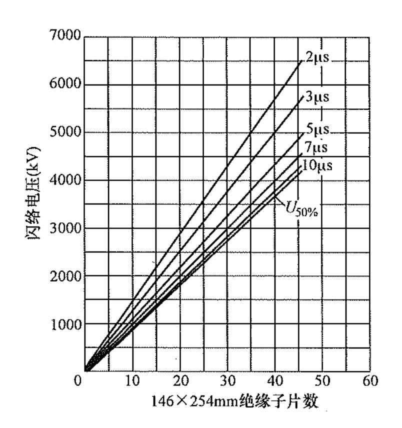


图 3-137 长绝缘子串负极性雷电冲击闪络电压曲线

（在绝缘子串导线端加－1.5/40μs 冲击波）

图 3-138 X－4.5、П－6 绝缘子串正极性雷电冲击闪络电压曲线

1—X－4.5（146×254mm）；2—X－4.5C（150×254mm）；3—П－6

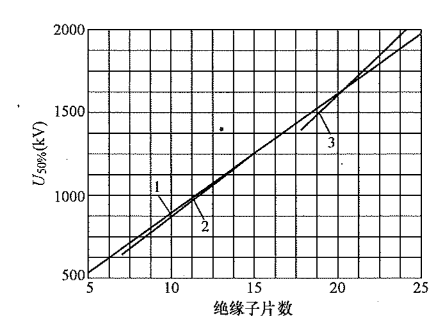


图 3-139 绝缘子串正极性雷电冲击闪络电压曲线

1—X－7（150×260mm）；2—玻璃绝缘子 LX－7（146×254mm）；3—双联耐张 X－7（老型号 170×280mm）数据已按 GB 311—64 校正至标准状态

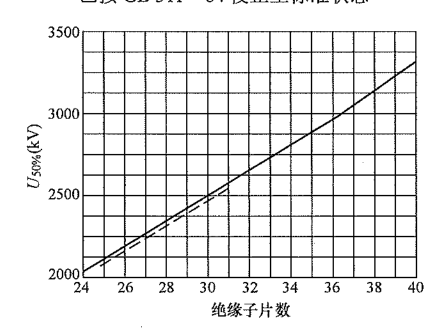


图 3-140 XP－16（155×254mm）绝缘子串正极性雷电冲击闪络电压曲线

注：四分裂导线，上扛线夹，无均压环及屏蔽环；实线为原水利电力部电力科学研究院高压研究所的试验曲线（σ%≈2%）；虚线为北京电力试验研究所的试验曲线（σ%=1%～2%）。

（四）雷电过电压作用下塔头绝缘配合设计

1. 绝缘子片数的确定

一般不按雷电过电压的要求来选择绝缘子串的绝缘强度，但应根据已选定的绝缘水平（即按工频泄漏距离及操作过电压要求选定的绝缘子型式及片数）来检验线路的耐雷水平，并应符合 GB 50064—2014 的规定。如果在某些情况下雷击跳闸率太高，则可根据具体情况（如考虑采用降低接地电阻等其他综合措施后）酌量增加绝缘子片数。

根据 GB 50545—2010 规定，在海拔 1000m 以下地区，操作过电压及雷电过电压要求的悬垂绝缘子串绝缘子片数，不应少于表 3-63 的数值。耐张绝缘子串的绝缘子片数应在表 3-63 的基础上增加，对 110～330kV 输电线路增加 1 片，对 500kV 输电线路增加 2 片，对 750kV 输电线路不需增加片数。

表 3-63 操作过电压及雷电过电压要求悬垂绝缘子串的最少片数

标称电压（kV）	110	220	330	500	750
单片绝缘子的高度（mm）	146	146	146	155	170
绝缘子片数（片）	7	13	17	25	32

根据 GB 50061—2010《66kV 及以下架空电力线路设计规范》在海拔 1000m 以下空气清洁地区，35kV 线路悬垂绝缘子串的绝缘子数量宜采用 3 片，66kV 线路悬垂绝缘子串的绝缘子数量宜采用 5 片。耐张串绝缘子数量应比悬垂绝缘子串同型号的绝缘子多一片。对全高超过 40m 有地线的杆塔，高度每增高 10m，应增加一片绝缘子。

根据 DL/T 5504—2015《特高压架空输电线路大跨越设计技术规定》在海拔 1000m 以下地区，1000kV 线路工频电压、操作过电压、雷电过电压要求下的悬垂绝缘子串绝缘子片数，不宜少于表 3-64 的数值。耐张绝缘子不需增加片数。

表 3-64　1000kV 线路工频电压、操作过电压要求的悬垂绝缘子串片数

电压（kV）	工频电压	操作过电压	雷电过电压
盐密（mg/cm²）	0.06		
单片绝缘子高度/爬距（mm）	195/635	195/635	195/635
绝缘子片数（片）	54	39	43
备注		1.7p.u.=1909kV（中相已考虑 2 片零值）	单回路塔全高 60m，冲击接地电阻 R_{ch}=15Ω 满足 200kA 耐雷水平

根据 GB 50064—2014、DL/T 5504—2015 等规定在下列情况下需按大气过电压要求增加绝缘子片数。

（1）750kV 以下线路对装有地线的杆塔，当全高超过 40m 后，每增高 10m 应增加一片绝缘子。当全高超过 100m 后，绝缘子数量应结合运行经验，通过雷电过电压的计算来确定。

（2）1000kV 为保持高杆塔的耐雷性能，全高超过 60m 有地线的杆塔，高度每增高 10m，雷电过电压片数增加 1 片相当于高度为 146mm 的绝缘子。由于高杆塔而增加绝缘子片数时，雷电过电压最小间隙也相应增大。

（3）未沿全线架设地线的 35kV 新建线路中的大跨越段，宜架设地线或安装线路防雷用避雷器，并应比一般线路增加一个绝缘子。

2. 复合绝缘子的外绝缘配置

根据 DL/T 1122—2009《架空输电线路外绝缘配置技术导则》建议，不同雷电区复合绝缘子的外绝缘配置应满足如下要求：

（1）多雷区线路使用复合绝缘子时，干弧距离应加长 10%～15%，或综合考虑在导线侧加装 1～2 片悬式绝缘子。500kV 复合绝缘子的干弧距离不宜小于 4340mm（如 28 片结构高度为 155mm 的悬式瓷或玻璃绝缘子）的串长，220kV 复合绝缘子的电弧距离不宜小于 2044mm（如 14 片结构高度为 146mm 悬式瓷或玻璃绝缘子）的串长，110kV 复合绝缘子的电弧距离不宜小于 1022mm （如 7 片结构高度 146mm 悬式瓷或玻璃绝缘子）的串长。

（2）强雷区在满足风偏和导线对地距离要求的前提下，线路使用复合绝缘子时，干弧距离应加长 20%，或综合考虑在导线侧加装盘型悬式绝缘子（或使用瓷或玻璃复合伞裙绝缘子）。

3. 塔头空气间隙的确定

塔头空气间隙的雷电冲击击穿电压应该和绝缘子串的雷电冲击闪络电压相匹配。

根据 GB 50064—2014，风偏后导线对杆塔空气间隙的正极性雷电冲击电压 50%放电电压，750kV 以下等级可选为现场污秽度等级 a 级下绝缘子串相应电压的 0.85 倍，对 750kV 线路可为 0.8 倍，其他现场污秽度等级间隙也可按此配合。同塔双回线路采用悬垂绝缘子无风时，导线对横担空气间隙的正极性雷电冲击电压 50%放电电压宜与现场污秽度等级 a 级下绝缘子串相当。雷电过电压下风偏计算用的风速，对于基本风速折算到导线平均高度处风速不小于 35m/s 时宜取 15m/s，否则宜取 10m/s。如因高海拔而需增加绝缘子数量，则雷电过电压最小间隙也应相应增大。

六、空气间隙

（一）悬垂绝缘子串摇摆角计算

以上各款论述了在运行（工频）电压、操作过电压及雷电过电压作用下绝缘子片数及塔头空气间隙数值的选取，并指出这种空气间隙数值是指在规定风速下绝缘子串相应风偏后带电体对塔构所应保持的最小距离。因此，为了最终确定直线塔塔头间隙尺寸，尚必须对绝缘子串的风偏大小进行计算。

绝缘子串的风偏大小依其所产生的风偏角大小来表示。绝缘子串的风偏角可按下式计算

$$\varphi=\arctan\left(\frac{W_I/2+Pl_H}{G_I/2+Gl_H+\alpha T}\right)=\arctan\left(\frac{W_I/2+Pl_H}{G_I/2+Gl_v}\right) \tag{3-245}$$

式中　φ——悬垂绝缘子串风偏角，（°）；

W_I——悬垂绝缘子串风压，N；

G_I——悬垂绝缘子串重力，N；

P——相应于工频电压、操作过电压及雷电过电压风速下的导线风荷载，N/m；

G——导线自重力，N/m；

l_H——悬垂绝缘子串风偏角计算用杆塔水平档

距，m；

l_v——悬垂绝缘子串风偏角计算用杆塔垂直档距，m；

α——塔位高差系数；

T——相应于工频电压、操作过电压及雷电过电压气象条件下的导线张力，N。

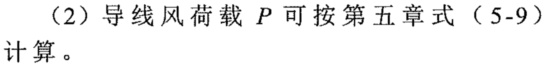
下面对公式中各参数数值的选取进行说明。

（1）悬垂绝缘子串风压（W_I）按下式计算

$$W_I = 9.81 A_I \frac{v^2}{16} \tag{3-246}$$

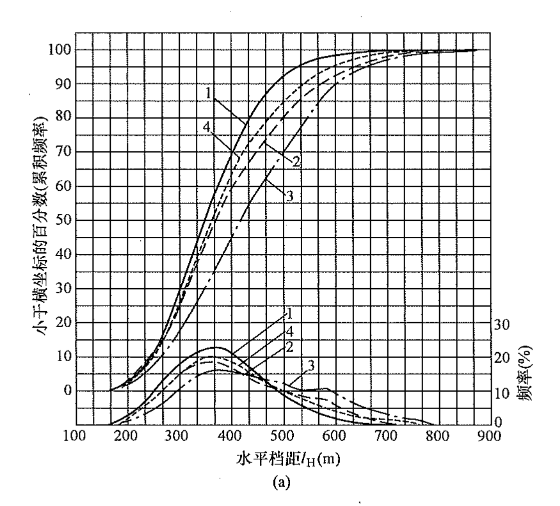
式中 v——设计风速，m/s。

A_I——绝缘子串的受风面积，m^2。单盘盘径为254mm的绝缘子，每片受风面积取0.02m^2，大盘径及双盘径者取 0.03m^2。金具零件受风面积，对单导线每串取 0.03m^2，对两分裂导线，每串取0.04m^2，对3～4分裂导线，每串取0.05m^2。双联绝缘子串的受风面积，可取为单联的1.5～2.0倍。



（2）导线风荷载 P 可按第五章式（5-9）计算。

（3）杆塔水平档距 l_H 的选取：图 3-141（a）、（b）分别列出了西南电力设计院统计的 220kV 线路及东北电力设计院统计的 500kV 线路，在各种地形情况下的水平档距频率分布及累积频率分布曲线可供参考。规划塔头间隙圆图时，可根据地形及拟规划杆塔的档距使用范围，并参考图 3-141（a）、（b）或既有的实际经验，即可确定相应的水平档距。应该说明，杆塔荷载规划使用的水平档距，应采用拟规划杆塔水平档距使用范围的上限，而塔头规划使用的水平档距，则应使其所规划的塔头尺寸能满足该型塔的水平档距使用范围。在 α、T 等参数一定时，往往选用拟规划杆塔水平档距使用范围的下限（或接近下限的某一水平档距），否则摇摆角偏小。因此，杆塔荷载规划用的水平档距与塔头规划用的水平档距往往是不一致的。



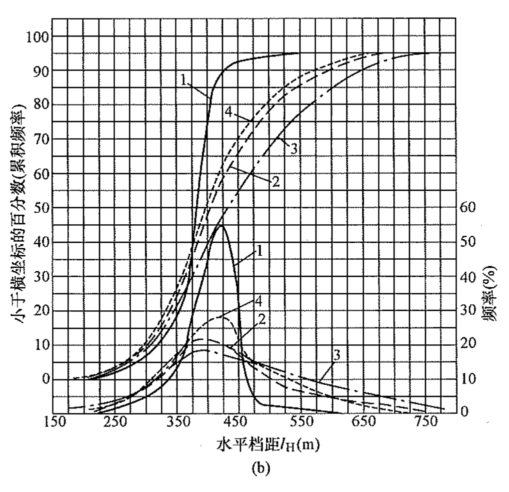


图 3-141 线路水平档距（l_H）频率分布及累积频率分布曲线

（a）220kV 线路水平档距（l_H）频率分布及累积频率分布曲线

1—平丘；2—山丘；3—山地；4—综合

（b）500kV 线路水平档距（l_H）频率分布及累积频率分布曲线

1—平地；2—丘陵及一般山地；3—大山地；4—综合

（4）垂直档距 l_v、导线张力 T 及塔位高差系数 α 的选取：垂直档距 l_v 可按式（5-29）计算。

由式（5-29）可以看出，l_H、l_v、σ_0（或水平张力 T）、α 四个参数的选取是相互有关的。将式（5-29）代入式（3-245）的后半式，即可得其前半式。有些设计者习惯于用 l_H、α、T 三参数来确定风偏角，有些设计者则习惯于用 l_H 及 l_v 两参数来确定风偏角。

当用 l_H、α、T 三参数来确定风偏角时，对平地，α 一般取 -0.03～-0.05，对丘陵及低山地，α 一般取 -0.06～-0.08，对山地（包括大山地），α 一般取 -0.08～-0.15。至于导线张力 T，则与代表档距有关，因而也就与地形有关。一般取在相应地形下可能出现的代表档距范围内张力稍大一点的代表档距。

当用 l_v 及 l_H 来确定风偏角时，其数值的选取可根据经验来确定。从杆塔定位验证来看，$K=l_{vd}/l_H$（l_{vd} 表示最大弧垂工况时之垂直档距），平地一般取 0.75 左右，丘陵及低山地一般取 0.65～0.75，山地及大山地一般取 0.55～0.65。

当确定了 K 值或 α 值后，可用下式求得雷电、操作或工频条件下的 l_v。

$$
\begin{aligned}
l_v &= l_H\left[1+(K-1)\times\frac{TW_d}{T_dW_1}\right] \\
&= l_{vd}-\left(\frac{T_d}{W_d}-\frac{T}{W_1}\right)\times\alpha
\end{aligned}
\tag{3-247}
$$

式中 T_d——最大弧垂工况时导线张力，N；

T——雷电、操作或工频条件下的导线张力，N；

W_d——最大弧垂工况导线自重力，N/m；

W_1、α 符号的含义同式（3-245）。

将式（3-247）算得的不同条件下的 l_v 代入式（3-245），即可得不同条件下的绝缘子串风偏角。

（二）直线杆塔间隙圆图的绘制

悬垂绝缘子片数及串长（包括连接金具）以及运行（工频）电压、操作过电压、雷电过电压所需空气间隙距离和其相应的风偏角确定之后（若需要考虑带电检修，则尚应包括带电检修的情况），即可着手进行直线杆塔间隙圆图的绘制，以最终确定直线塔塔头间隙尺寸。随着计算机技术的发展，大多采用程序计算。为方便设计者，本手册介绍手工间隙、计算方法供参考。

1. 自立式塔及内拉线塔间隙圆图的绘制

此类塔的特点是塔头纵向（沿线路方向）宽度不大，只需根据绝缘子串长度及悬垂绝缘子串的风偏角，并适当考虑塔身边缘导线弧垂的影响，在杆塔正面图上绘出间隙圆即可，其情况如图 3-142 所示。

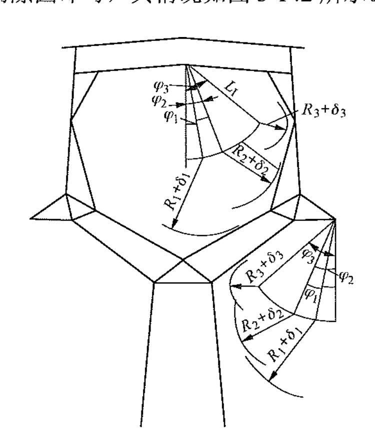


图 3-142 自立式塔正面间隙圆图

图 3-142 中 L_I 为绝缘子串串长，φ_1、φ_2、φ_3 及 R_1、R_2、R_3 分别为雷电过电压、操作过电压及运行（工频）电压情况下的绝缘子串风偏角及间隙距离。φ_1、φ_2、φ_3 为考虑塔身边缘导线弧垂影响而引入的数值，其计算公式见式（3-245）。

图中间隙圆与塔头单线图轮廓线不应相切，应留 0.1m 左右的裕度，这主要是考虑杆塔单线图与制造图的差别、制图误差以及实际杆塔组装误差的影响。

2. 外拉线塔间隙圆图的绘制及检查

在有拉线的情况下，因拉线顺线路方向的尺寸可长达 10 多米，导线下垂和它的风偏实际上就比较大，因此单纯的正面图一般说来不再能说明问题，常需另做较细致的检查。通常的方法是绘出与拉线垂直的平面上的投影，这时拉线投影成一点，而导线（指与塔身接近的那一段）则可足够近似地视为一直线，从而二者间的距离可以准确清楚地表示出来。

另外，也可以用计算公式算出距拉线的间隙 d。同样可以借助做正面间隙圆图的简单表示方法来检查间隙是否满足，此时间隙圆半径中应加入由于出口导线下垂、风偏对拉线的接近而应留出的裕度 δ。

（1）投影作图法。与拉线垂直的平面的投影图是由两个相互垂直的投影图构成的，图中导线各点对拉线的垂直距离按照下述原则相交而成。以图 3-143（a）的投影原理图为例，该图中水平虚线的上半部为正视（或侧视）图，而下半部则为其相应的平面图，该水平虚线则可理解为这两个投影面的分界线。

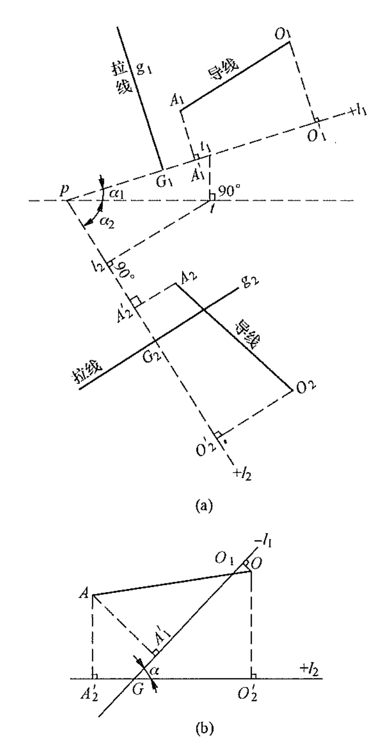


图 3-143 外拉线塔间隙圆投影原理图

（a）正、俯视投影图；（b）与拉线垂直平面的投影图

该图中除用实线标示出导线和拉线的投影外，其他全部虚线均系作图用的辅助线，图中 g_1、g_2 分别为空间拉线在正视（或侧视）和下视图上的投影，O_1A_1、O_2A_2 分别为空间导线 OA 在正视（或侧视）和下视图

上的投影。在正视图和下视图交线上任选一点 p 作水平分界线，并作 l_1 和 l_2 分别与拉线投影 g_1 和 g_2 垂直，得交点 G_1 和 G_2。随意指定其正方向如图所示，注意夹角 α_1 和 α_2 为这三者正方向间的夹角，然后过 O 点的投影 O_1 和 O_2 分别作 l_1 和 l_2 的垂线，得点 O_1' 和 O_2'；同样过 A 点的投影 A_1 和 A_2 得垂足 A_1' 和 A_2'。

图 3-143（b）为与拉线垂直的平面的投影。先任取一点 G 作为拉线在这个平面上的投影，然后过 G 作直线 l_1 和 l_2，也分别指定其正方向，这一步唯一的要求只是应使它们之间正方向的夹角 α 符合 $\cos\alpha=\cos\alpha_1\cdot\cos\alpha_2$ 的关系（注意超过 90° 的余弦是负数）。为了得出 A 点的投影，可在 l_1 上量取 GA_1' 使与正视（或侧视）图中的 G_1A_1' 相等，同样在 l_2 上量取 $GA_2'=G_2A_2'$。这一步应注意的是正、负方向不要弄错，如图中 GA_2' 就应向负方向量取，因在下视图中 A_2 系位于 l_2 的负侧。过 A_1' 和 A_2' 作 l_1 和 l_2 的垂线相交于 A，就是空间 A 点在这个平面上的投影。完全同样地使 $GO_1'=G_1O_1'$，$GO_2'=G_2O_2'$，得出 O 点的投影 O' 过 OA 的直线就是空中导线的投影，从 G 至 OA 的垂直距离就是导线和拉线在空中的净空距离。

角度 α 可以根据拉线的坡度算出，也可以从原始投影图上量 α_1 和 α_2 后算出，还可以直接作图得出。为此可在 l_1 上任取一点 t_1，依次作垂线得点 t 和 t_2，如图 3-143（a）所示，以 pt_1 为斜边，pt_2 为底边的直角三角形，其底角就是 α，即 $\cos\alpha=\dfrac{pt_2}{pt_1}$。

上述方法较为简明，其作图所依据的理由，只需将原始资料［见图 3-143（a）］沿分界线叠成彼此垂直的二平面即可看出。这时 l_1 和 l_2 在空间所组成的平面即为与拉线垂直的平面。其作图法示例见图 3-144。这种作图法适用于对直线（如拉线）的垂直平面投影，且垂直平面内的坐标夹角 α 是随着拉线的布置位置不同而变，故要特别注意夹角 α 计算与作图的正确性，否则会产生投影的错误。

为了避免上述非直角坐标夹角 α 的计算或作图易产生错误，仍根据上述原理，选择其 $\alpha=90°$ 的投影面作图法，其作图示例见图 3-145。作图步骤是：① 先做杆塔正视及下视图；②根据正视、下视图中的数据，作拉线与地所成垂直平面上的侧视图；③根据下视与侧视图中各点到拉线的垂直投影距离，作出垂直拉线的平面投影图，其作图方法是先划一直角坐标（即 pl_1、pl_2 补助线），坐标原点 G 即拉线投影为一点的位置，将侧视图中各投影点到拉线的垂直投影距离分别标在相应的坐标线上，每两相应的垂距相交的交点即为各投影点。简言之，将下视图与侧视图以拉线为坐标轴成直角相重叠，各点的平行投视线两两相应相交，所得交点即为垂直拉线的平面投影图。该作图法一般均需多作一个侧视图，但省去了作辅助线和计算 α 角的工作。

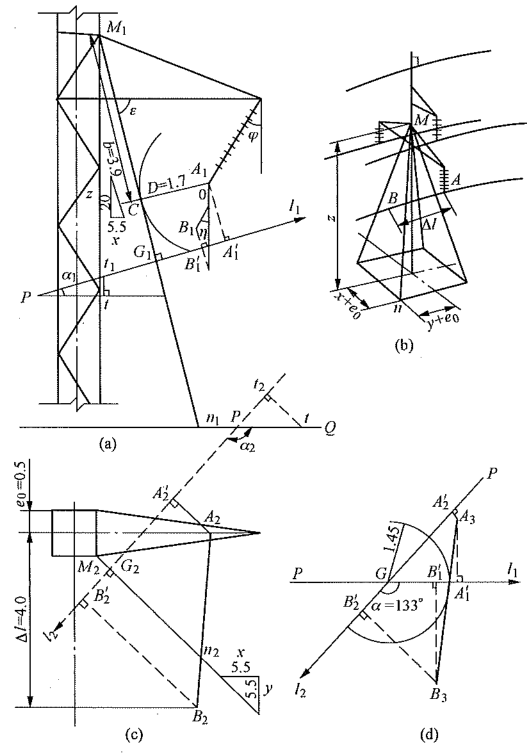


图 3-144　外拉线塔间隙圆投影图（一）

（a）正视图；（b）立体图；（c）下视图；（d）垂直拉线平面投视图

现将图 3-144 中的符号说明如下：

$$OB=\Delta f=\frac{\gamma_6(l-\Delta l)\Delta l}{2\sigma\cos\beta};$$

$$\Delta f_n=\Delta f\sin\eta;$$

$$AO=\Delta l\tan\beta;$$

$$F_2A_2=FA;\ K_2B_2=KB,\ G_1a=Ga;$$

$$G_1b=Gb;\ G_1e=Ge;$$

L_I——悬垂绝缘子串长度；

Δf——线夹出口 Δl 处的弧垂；

ψ——拉线与地垂线间的夹角，

$$\psi=\arctan\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{z-\Delta s};$$

l——档距长度，m；

β——单侧悬挂点高差角，(°)；

σ——导线应力，N/mm²；

γ_6——导线综合比载，N/（m·mm²）；

Δl——导线 B 点到悬挂点 A 间的水平距离（设为 3～6m）；

α——垂直拉线平面内坐标夹角（恒为 90°）；

ϕ——悬垂绝缘子串风偏角，（°）；

r——间隙半径，m；

Δs——横担下沿至拉线挂点距离，m；

η——导线风偏角，$\eta=\arctan\dfrac{\gamma_4}{\gamma_1}$，$\gamma_1$ 为导线自重比载，γ_4 为导线风荷载比载。

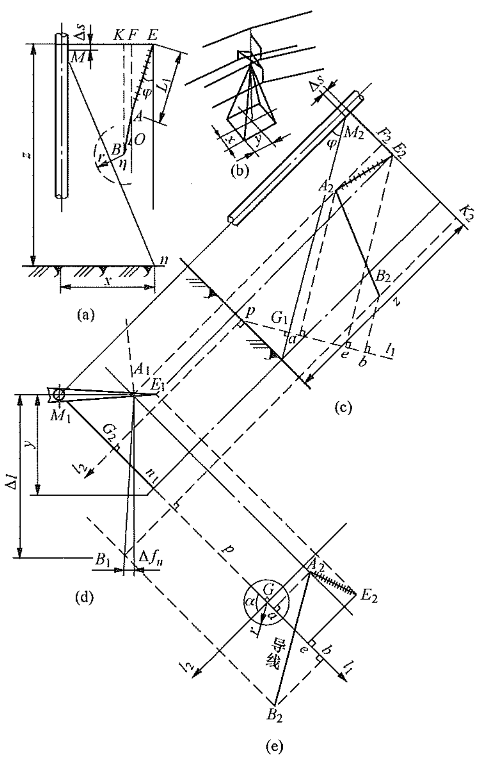


图 3-145　外拉线塔间隙圆投影图（二）

（a）正视图；（b）立体示意图；（c）拉线平面侧视图；（d）下视图；（e）垂直拉线平面投影图解

【例 3－7】 有一单柱 220kV 直线拉线塔，试用作图法检查操作过电压时下导线对拉线的间距。拉线布置如图 3-144 所示。绝缘子串长度为 2.3m，摇摆角 ϕ 为 35°。

解　首先作出相互垂直的两个塔头部分正、下视图。画出导线出口一段的位置，取 Δl=4m。有关原始数据如下：

导线为 LGJ－240，应力 σ=65.7N/mm²，比载 $\gamma_1=34.8\times10^{-3}$N/(m·mm²)，$\gamma_4(18)=16.79\times10^{-3}$N/(m·mm²)；$\gamma_6(18)=38.6\times10^{-3}$N/(m·mm²)，导线风偏角 $\eta=\arctan(\gamma_4/\gamma_1)=25.8°$。设档距 l=500m（取较大者），单侧高差系数 $\alpha_h=\dfrac{h}{l}=0.15$（取正值较大者）。出口 4m 处由于高差引起的垂距 $A_1O=\alpha_h\Delta l$=0.6m；导线弧垂（风偏后）引起的下垂 $OB_1=\dfrac{\Delta l(l-\Delta l)\gamma_6}{2\sigma}=0.582$ m。

第二步，作垂直拉线的坐标线 Pl_1、Pl_2，并将各带电点投影到 Pl_1、Pl_2 上，如图 3-144 中 A_1'、B_1'，A_2'、B_2'。然后计算两坐标轴间的夹角 α。

$$\cos\alpha_1=\frac{z}{\sqrt{x^2+z^2}}=\frac{20}{\sqrt{5.5^2+20^2}}=0.965$$

$$\cos\alpha_2=\frac{y}{\sqrt{x^2+y^2}}=\frac{-5.5}{\sqrt{5.5^2+5.5^2}}=-0.707$$

$$\cos\alpha=\cos\alpha_1\cos\alpha_2=-(0.707\times0.965)=-0.68$$

$$\alpha=180°-\cos(-0.68)=133°$$

或自图 3-143 中量得

$$\cos\alpha=\frac{pt_2}{pt_1}=\frac{-1}{1.5}\approx-0.67$$

第三步，作垂直拉线的平面投影图，将两坐标轴 pl_1、pl_2 按 α 角相交，交点 G 为拉线两投影点 G_1、G_2 的重合点。按图 3-143 投影原理图的作图方法即可绘出出口一段导线 A_3B_3 在垂直拉线投影图中的投影位置（见图 3-144）。自 G 点向 A_3B_3 线作垂线量得拉线距导线的最小间距在操作过电压时满足 1.45m。

（2）公式计算法。当已知塔头正面图中导线悬挂点 A_1 到拉线间的正面投影垂距 D（见图 3-144）以及垂足 C 点到拉线上端固定点 M_1 间的间距 b 时（M_1 在 C 点上方为正，反之为负），便可用下式计算导线出口附近对拉线的间距 d。

$$\left.\begin{aligned}
d&=\frac{D-e_A\tan\theta'}{\sec\theta'}\approx\frac{D-e_A\tan\theta'}{1+\frac{1}{2}\tan^2\theta'}\\
\tan\theta'&=\frac{\alpha_h\cos\varepsilon+\frac{\gamma_6 l}{2\sigma}\cos(\varepsilon-\eta)}{\cos\beta-\sin\beta\left[\alpha_h\sin\varepsilon+\frac{\gamma_6 l}{2\sigma}\sin(\varepsilon-\eta)\right]}\\
e_A&=e_0\cos\beta+b\sin\beta
\end{aligned}\right\}\tag{3-248}$$

式中　α_h——导线单侧高差系数，$\alpha_h=h/l$；

ε——正面图中拉线与横担水平面间的夹角，$\tan\varepsilon=\dfrac{z}{x}$；

β——侧视拉线所在平面内的拉线与主柱间的投影夹角，$\cos\beta=\sqrt{\dfrac{z^2+x^2}{x^2+y^2+z^2}}$；

$$\sin\beta=\frac{y}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}};$$

η——导线风偏角，$\eta=\arctan\dfrac{\gamma_4}{\gamma_1}$；

l——检查侧的档距，m；

γ_6，σ——导线有风时的综合比载 [N/（m・mm²）] 及导线水平应力（N/mm²）；

e_0——杆塔侧面拉线悬挂点到杆身中心线之间距离。

【例 3-8】 仍利用作图法的前例数据，参看图 3-144。已知 $D=1.7$m，$b=3.9$m，$e_0=0.5$m，$\eta=25.8°$，求操作过电压时下导线对拉线的间距。

解　$\varepsilon=\arctan\dfrac{20}{5.5}=74.6°$，$\sin\varepsilon=0.964$，$\cos\varepsilon=0.266$

$$\cos\beta=\sqrt{\frac{20^2+5.5^2}{2(5.5)^2+20^2}}=0.966$$

$$\sin\beta=\frac{5.5}{\sqrt{2(5.5)^2+20^2}}=0.256$$

$$e_A=0.5\times0.966+3.9\times0.256=1.483$$

$$\tan\theta'=[0.15\times0.266+38.6\times10^{-3}\times500\times\cos(74.6°-25.8°)/2\times65.7]\div\{0.966-0.256[0.15\times0.964+38.6\times500\times10^{-3}\sin(74.6°-25.8°)/2\times65.7]\}$$

$$=\frac{0.0398+0.0968}{0.966-0.256\times0.255}=0.1515$$

$$d=\frac{1.7-1.483\times0.1515}{1+0.5\times0.1515^2}=\frac{1.475}{1.012}=1.46\text{m}$$

计算结果与作图法所得值是一致的，但不够直观，容易产生计算错误。

（3）预留间隙裕度法。对于具有拉线的直线杆或宽身塔，仍可如图 3-143 中通过画正面间隙圆图的方法来表示导线对构件的间距，但为了考虑出口附近导线下垂与风偏对拉线或构件的接近，可通过公式计算求出各种校验条件下在正面图中应留的裕度δ值，即间隙圆的半径应为 $R+\delta$，且圆弧应不割入正面图中的构件内。δ值可按下式计算

$$\delta=e_A\tan\theta'+R(\sec\theta'-1)\approx\tan\theta'(e_A+0.5R\tan\theta')\tag{3-249}$$

式中所有符号含义与式（3-248）同。仍以上例数据举例求得（设 $R=1.45$）：

$$\delta=0.1515(1.483+0.725\times0.1515)=0.242\text{m}$$

当$\beta=0$ 时，拉线相当于侧面等宽的宽度为 $2e_0$ 的宽身构件，其计算公式则变成式（14-4）的形式。

（三）非直线杆塔的间隙设计及跳线计算

非直线塔（包括直线耐张及转角塔）的间隙设计实质上就是按运行（工频）电压、操作过电压及雷电过电压确定的间隙距离，并计及跳线（亦称引流线）的风偏摆动来确定跳线弧垂、线长以及塔头尺寸。在设计非直线塔时，可预先选定一初步的塔型及塔头正、侧面尺寸，然后进行跳线计算，看其是否符合要求，并按计算结果来修正原初步拟定的塔头尺寸。当塔头尺寸确定后，即可按实际塔头尺寸进行跳线施工弧垂及线长的计算以供安装使用。

跳线一般有直引和绕引两种。直引跳线如同穿过塔头空间的一个小孤立档导线；绕引跳线如同中间具有一（或二）个直线转角的两（或三）个连续档。跳线由于线长较短，导线的刚性对跳线的几何形状与风偏摆动是有一定影响的，但为简化计算，通常均假定跳线柔软而呈悬链线或抛物线状。

1. 直引跳线计算

直引跳线计算主要是选取一个合适的跳线弧垂或线长。弧垂太小会引起跳线对横担及上部构件间隙不足；太大又可能引起对塔身、拉线和下部构件间隙不足。由于跳线悬挂点（即耐张线夹尾端）的位置在各种校验条件下是变化的，因而弧垂也不同，较为合理的跳线计算方法是首先假定一个跳线长度，并认为在各校验条件下（如雷电过电压、操作过电压、工频电压条件）线长保持不变，依此借助公式或链条、弧垂模板等，比拟画出跳线在塔头正、下、侧视图中各校验条件下的投影位置，然后检查跳线各点对周围构件的空气间隙；若间隙不满足或不匀称，可重新选定线长另行计算。上述计算法由于考虑了跳线档距、弧垂是变化的，因此换算计算与作图比较麻烦。实际计算中是更为粗糙地假定跳线在各种校验条件下的弧垂是不变的，依此便可选跳线施工弧垂为各校验条件下跳线最小允许弧垂 f_{min} 的最大值与最大允许弧垂 f_{max} 最小值的平均值。其计算步骤如下：

（1）计算跳线作图中的原始数据，如逐塔计算雷电过电压条件下的耐张绝缘子串倾斜角（其他条件选择计算）；计算代表性的耐张绝缘子串水平风偏角，跳线风偏角等。

耐张绝缘子串倾斜角θ系耐张绝缘子串与横担水平面间的夹角，图 3-146 示出绝缘子串所在平面内的受力图。θ下倾为正角，上仰为负角，其算式为

$$\theta=\arctan\frac{0.5G_v+W_v}{T}=\arctan\left(\frac{G_v+g_1l}{2T}+\frac{h}{l}\right)\tag{3-250}$$

式中　G_v——耐张绝缘子串重力，N；

W_v——作用于绝缘子串末端的相导线重力，N；

g_1——相导线单位长度自重力，N/m；

l、h——计算侧档距及高差，m，当比邻塔低时 h 为负值；

T——计算条件下的相导线水平张力，N。

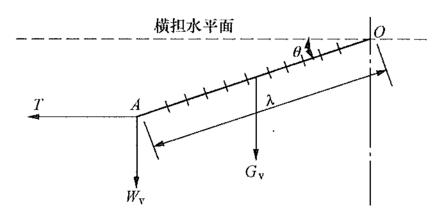


图 3-146　耐张绝缘子串倾斜角θ计算图

耐张绝缘子串水平风偏角φ，系风垂直导线吹时引起耐张绝缘子串在水平面内的偏移角度，受力图如图 3-147 所示，其算式为

$$\left.\begin{aligned}\varphi&=\arctan\frac{G_H+g_4 l}{2T}\\G_H&=9.81A_I\frac{v^2}{16}\end{aligned}\right\}\quad(3\text{-}251)$$

式中　G_H——耐张绝缘子串所受风压，N；

A_I——绝缘子串受风面积，m^2；

v——风速，m/s；

g_4——相导线计算条件下的单位风荷载，N/m；

T、l的符号含义同前。

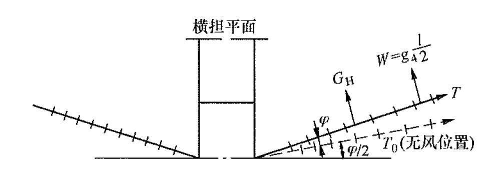


图 3-147　耐张绝缘子串水平风偏角φ计算图

图 3-147 中φ为线路转角度数。φ角的正、负选取应依跳线距构件最接近为原则。由于φ角较小，对跳线计算影响不大，一般仅取一有代表性的常数。

跳线风偏角η，仍同前述导线风偏角一样近似取$\eta=\arctan(\gamma_4/\gamma_1)$，不考虑跳线悬挂点刚性影响。

（2）图解跳线最小允许弧垂f_{min}。最小允许弧垂值是在各种校验条件下跳线各点与横担或第一片绝缘子铁帽间应保持有最小的规定间距下定出的，它的大小系指横担下沿至塔身宽度内跳线最低点间的垂直距离。对于小转角和耐张杆塔，图解最小弧垂时，一般仅需在横担侧视图中比拟即可，如图 3-148 所示，在图中近似地认为跳线与耐张绝缘子串均位于侧视平面图内。实际工程中同一塔型使用多基，可仅选一代表性的较严重情况进行弧垂计算。为了得到最小弧垂的较大值，选取代表条件时应取转角较大，两侧（或一侧）绝缘子串倾斜角较小者。按各种校验间隙条件下绝缘子串的倾斜数据作出侧视图（图 3-148 中仅表示了一种校验情况），在图中以最接近跳线的接地构件端头为圆心（如横担下沿角或第一片绝缘子铁帽O点），以要求间隙R_1为半径画间隙圆，以链条或弧垂模板比拟出风偏下最小允许弧垂的垂直投影f'_{1min}、f'_{2min}等，并算出各最小允许弧垂$f_{1min}\approx\dfrac{f'_{1min}}{\cos\eta_1}$、$f_{2min}\approx\dfrac{f'_{2min}}{\cos\eta_2}$等，取其各最小允许弧垂中的最大值为设计最小弧垂$f_{min}$。在图 3-148 中绝缘子串的投影位置是由以下数据画出

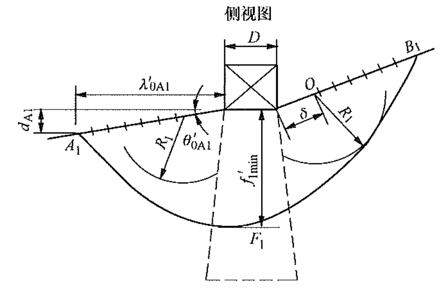


图 3-148　跳线最小弧垂图解图（一）

$$\left.\begin{aligned}d&=\lambda\sin\theta\\\lambda'_0&=\lambda\cos\theta\cos\left(\frac{\psi}{2}\pm\varphi\right)\\\theta'&=\arctan\frac{\sin\theta}{\cos\theta\cos(\psi/2\pm\varphi)}\end{aligned}\right\}\quad(3\text{-}252)$$

式中　λ——耐张绝缘子串长度，m；

ψ——线路转角度，（°）。

当线路转角较大时，由于在侧视图中跳线与接地构件并不在一个平面内，必须利用侧视图和下视图中跳线对构件的两个正交投影距离x、y，求出空间间隙$\rho=\sqrt{x^2+y^2}$，$\rho\geqslant R$时则表示间隙满足要求。图 3-149 示出跳线最小弧垂时对第一片绝缘子铁帽间的净距投影。如$\rho_d=\sqrt{y_d^2+x_d^2}=\sqrt{(\overline{od_1})^2+(\overline{od_2})^2}$。

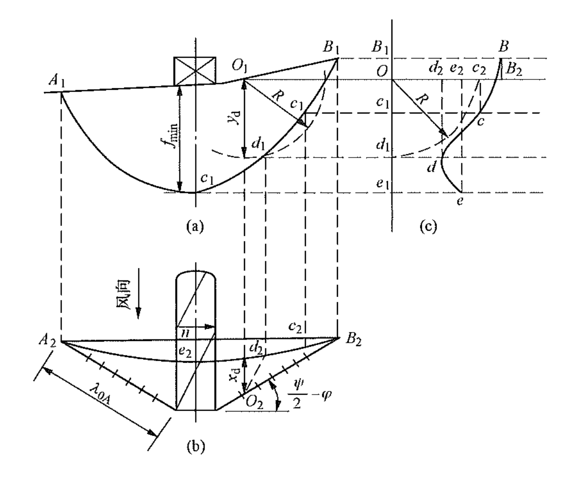


图 3-149　跳线最小弧垂图解图（二）

（a）侧视图；（b）俯视图；（c）O点距跳线净距图

$ne_2=f_{min(h)}\approx f'_{min}\tan\eta=f_{min}\sin\eta$；$\lambda_0=\lambda\cos\theta$

λ—耐张绝缘子串长；θ—耐张绝缘子串倾斜角；η—跳线风偏角

（3）图解跳线最大允许弧垂。最大允许弧垂是考虑跳线在各校验条件下风偏时，满足对塔身构件、拉线的要求间隙下求出的，并取其各最大允许弧垂中的最小值作为计算最大允许弧垂。对无拉线杆塔，一般仅利用塔头正视图进行最大弧垂的图解，如图 3-150 所示（图中为醒目起见，仅画出了一种校验条件）。图中：$e_{cp}=\frac{1}{2}(\lambda_A\cos\theta_A+\lambda_B\cos\theta_B)\times\sin\left(\frac{\psi}{2}\pm\varphi_p\right)$ 为跳线两侧悬挂点的平均水平位移；$d_{cp}=\frac{1}{2}(\lambda_A\sin\theta_A+\lambda_B\sin\theta_B)$ 为跳线两侧悬挂点的平均垂直位移（图中 d_{cp} 为负值），跳线最大允许弧垂为 $f_{max}=S+d_{cp}$（取其最小值）。为了得到较小的最大允许弧垂，选择θ、λ、ψ、φ数据时应使 d_{cp} 最小（如为负值），e_{cp} 最大。

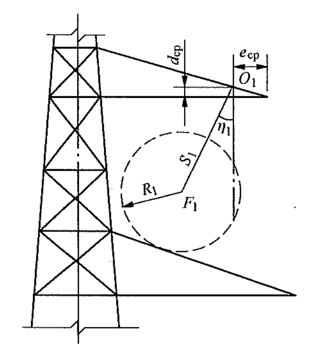


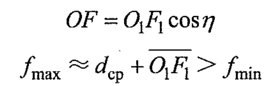
图 3-150 跳线最大弧垂图解图（一）

对于拉线杆塔，为了求得拉线间隙控制下的最大允许弧垂，可按前述拉线间隙的投影方法作出如图 3-151 垂直拉线平面的投影图（图中仅示出一种校验条件）。由于开始不知道最大允许弧垂数值，可先假设各校验条件时的最大允许弧垂大于已选出的最小允许弧垂，或者取任意值定出各图中 F_1、F_2 点，O 点为 A、B 悬挂点连线的中点。在垂直拉线平面投影图中，悬挂点 A_3、B_3 和跳线档中央假定弧垂点 F_3 是利用正、下视图中的尺寸投影画出的，O_3 点或利用投影得到或取 A_3B_3 连线中间点即是，O_3F_3 既为假定弧垂摇摆部分的投影长度，又为跳线综合荷载作用线的投影，故置图使 O_3F_3 方向垂直于地面，用链条或模板过 A_3、F_3、B_3 点作出跳线投影位置，若刚好切于拉线间隙圆，则最大弧垂为 $f_{max}=d_{cp}+O_1F_1$，否则应找出使链条与拉线间隙圆相切时跳线在 O_3F_3 线上的交点 F_x，按照比例关系 $f_{max}=d_{cp}+O_1F_1\frac{O_3F_x}{O_3F_3}$（取各种校验条件的最小值）。

现将图 3-151 中的符号说明如下：

$$\lambda'_0=\lambda\cos\theta\cos\left(\frac{\psi}{2}\pm\varphi\right)$$

$$d=\lambda\sin\theta$$



$$OF=O_1F_1\cos\eta$$

$$f_{max}\approx d_{cp}+\overline{O_1F_1}>f_{min}$$

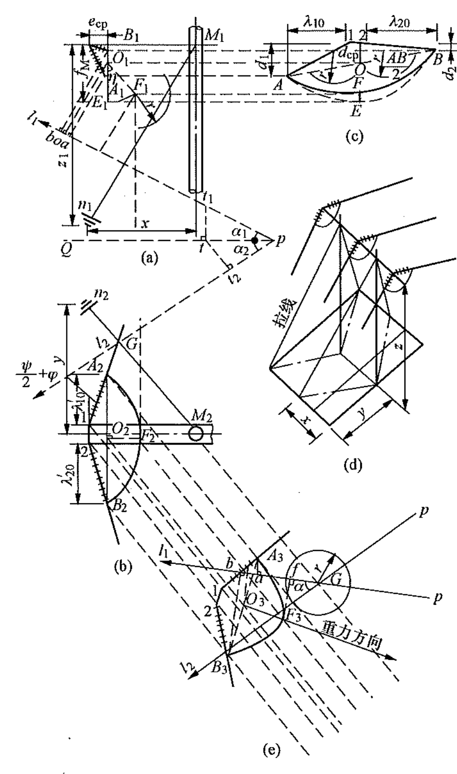


图 3-151 跳线最大弧垂图解图（二）
（a）正视图；（b）俯视图；（c）跳线侧视图；（d）整体示意图；（e）垂直拉线平面投影图

$$OB=OA=\frac{AB}{2}$$

$$O_2F_2=O_1F_1\sin\eta$$

$$O_1E_1=O_1F_1=OE$$

$$\cos\alpha_1=\frac{z}{\sqrt{x^2+z^2}}$$

$$\cos\alpha_2=\frac{y}{\sqrt{x^2+y^2}}$$

$$\cos\alpha=\cos\alpha_1\cos\alpha_2$$

或
$$\cos\alpha=Pt_2/Pt_1$$

式中 η——跳线风偏角；
λ——耐张绝缘子串长度；
θ——耐张绝缘子串倾斜角；
ψ——线路转角角度；
φ——耐张绝缘子串水平风偏角；
f——跳线弧垂；
α——垂直拉线平面的坐标间的夹角，即$\angle l_1pl_2$间的立体空间夹角。

当按图 3-151 的方法作图时要特别注意，α角的计算，y、z 的正负取决于 pl_1、pl_2、pQ 三者方向的选定，并要注意当 $\cos\alpha$为负值时α为大于 90° 的角，即

$$\alpha=180°-\arccos|\cos\alpha|$$

（4）确定跳线施工弧垂。跳线施工弧垂 f 应大于最小允许弧垂，小于最大允许弧垂。一般取 $f=\frac{f_{max}+f_{min}}{2}$。考虑到跳线的施工与气温变化等所产生的弧垂误差，如若$f_{max}-f_{min}<200mm$ 时，则认为跳线间隙不足，应加装跳线绝缘子串或其他措施防止跳线风偏摆动。

（5）跳线施工长度计算。根据已求得的跳线施工弧垂f，以雷电过电压气象条件下耐张绝缘子串的倾斜角，逐塔画出如图 3-148 所示的跳线两悬挂点及跳线所在平面侧视图，自横担“下沿”向下量 f 长，并通过末点画一水平线，将图纸垂直悬挂，以链条过两悬挂点并切于 f 末端水平线，此时记住链条两端位置，然后拉直链条量出两悬挂点间的线长即为跳线施工长度 L。

加装跳线悬垂绝缘子串时，悬垂线夹点可相当于f末端，模拟跳线长度时应使悬垂线夹两侧跳线稍有下垂而不致引起悬垂串上卷。当杆塔转角且加跳线绝缘子串时，跳线变成“绕引”形式，跳线悬挂点 A、B 和悬垂线夹点 F 不在一个垂直平面内，为模拟跳线长度，可将上述三点展开，放在同一个侧视平面图内，如图 3-152 所示。模拟线长时，以跳线呈链状通过 F 点为准。当跳线施工后，悬垂串受力向转角内侧偏移，跳线在 F 点两侧必然呈悬垂状。

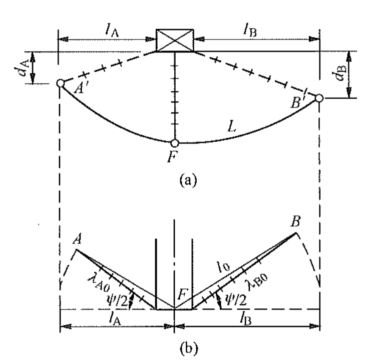


图 3-152 加装跳线绝缘子串时跳线弧垂及线长图解图

（a）侧视图；（b）俯视图

2. 绕引跳线计算

绕引跳线是耐张绝缘子串悬挂在杆塔主柱上，跳线借助塔身旁侧悬垂绝缘子串的支持，自塔身正面绕行旁侧接到塔身后侧耐张线夹处，如图 3-153 所示。一般设计中，跳线中间的悬垂线夹 B 点是可动的，它随跳线施工的松紧和悬垂串上作用的荷重不同而变化。绕引跳线的计算主要是选择一个合适的悬垂绝缘子串的施工偏角 ϕ_0（或偏距$\phi_0=\rho\sin\phi_0$），以及相应的施工线长 L_0，并检查跳线在各种校验条件下变位时，跳线对上、侧、下各面的构件间隙是否均能满足要求。图3-153 中仅示出跳线的一种校验条件间隙检查示意，其间隙检查方法仍可选同类塔型中的一基典型进行（如跳线一般通过转角内侧，故选转角较小者为严重情况），计算与图解步骤如下：

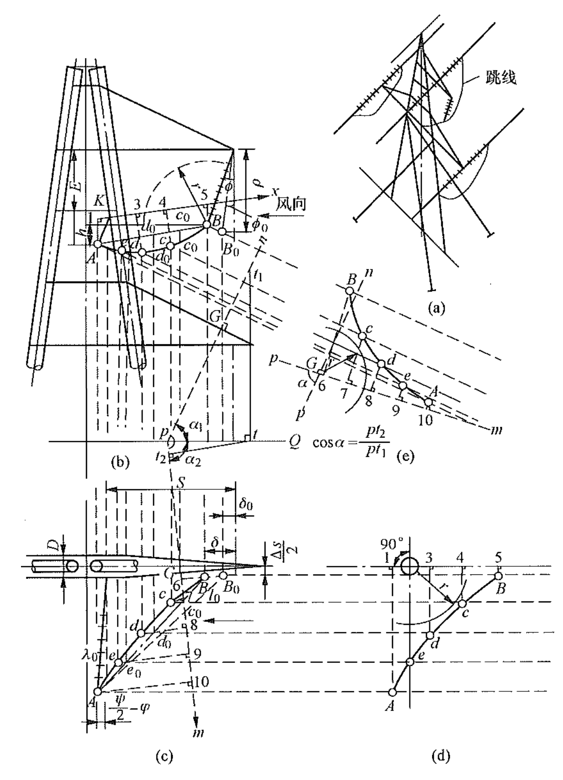


图 3-153 绕引跳线作图与间隙检查示意图

（a）整体示意图；（b）绕跳正视图；（c）俯视图；

（d）垂直于主杆平面内的投影图；

（e）垂直于下拉杆平面内的投影图绕跳施工图中应注明δ_0及 $\Sigma L=2L_0+\Delta s$

（1）计算施工时的跳线张力和线长。为作出跳线的正、俯视图（见图 3-153），先假设无风+15℃施工时，绕跳悬垂串拉偏角为 ϕ_0（位移δ_0），然后算出跳线单侧悬挂点 A、B 间档距 l_0及高差 h_0（假定两侧对称布置），继而算出跳线施工张力 T_0及单侧线长 L_0。选定偏角 ϕ_0 时应使跳线对构件的间距大于雷电过电压的间隙，一般选 10° 左右。

跳线在任意条件下的档距 l、张力 T、线长 L、弧垂f按式（3-253）计算。

$$
\left.\begin{aligned}
l&=\left\{\left[S-\lambda\cos\theta\sin\left(\frac{\psi}{2}-\varphi\right)-\rho\sin\phi\right]^2+\left[\lambda\cos\theta\cos\left(\frac{\psi}{2}-\varphi\right)+\frac{D-\Delta s}{2}\right]^2\right\}^{\frac{1}{2}}\\
T&=\frac{\tan\phi\left(0.5G_{\mathrm{v}}+g_1 l\right)-\left(0.5G_{\mathrm{H}}+g_4 l_{\mathrm{H}}\right)}{2\left(\cos\omega-\frac{h}{l}\tan\phi\right)}\\
L&=L_0=\frac{l}{\cos\beta}+\frac{l^3 g_1^2\cos\beta}{24T^2}\\
&=\frac{l_0}{\cos\beta_0}+\frac{l_0^3 g_1^2\cos\beta_0}{24T_0^2}\\
f_{x\mathrm{v}}&=\frac{x(l-x)g_1}{2T\cos\beta}\\
f_{x\mathrm{H}}&=\frac{x(l-x)g_4}{2T\cos\beta}\\
l_{\mathrm{H}}&=\lambda\cos\theta\cos\left(\frac{\psi}{2}-\varphi\right)+\frac{D-\Delta s}{2}\\
\omega&=\arccos\frac{S-\delta-\lambda\cos\theta\sin\left(\frac{\psi}{2}-\varphi\right)}{l}\\
h&=(E+\lambda\sin\theta)-\rho\cos\phi\\
\beta&=\arctan\frac{h}{l}
\end{aligned}\right\}\tag{3-253}
$$

式中 $f_{x\mathrm{v}}$、$f_{x\mathrm{H}}$——绕跳档距内任一点 x 之垂直及水平投影弧垂，m；

l_{H}——跳线作用于悬垂串上的受风水平档距，m，粗略计算可取为定值 l_0；

ω——档距 l 与横担中线间的水平夹角，(°)；

h——悬挂点间高差，m；

β——悬挂点间高差角，(°)；

g_1、g_4、g_6——跳线的单位长度自重力、风重力、综合荷载，N/m；

G_{v}、G_{H}——悬垂绝缘子串的垂直荷载、水平风荷载，N；

D、E、S、ρ、Δs 等符号的含义如图 3-154 所示。

式（3-253）是计算绕跳 L、T、l、f 时的通式，在第一步计算时应假定无风。根据假定无风偏角 ϕ_0，利用式（3-253）便可求出施工时的跳线各点弧垂 $f_x=f_{x\mathrm{v}}$，画于正、下视图中大致检查间隙是否合适。若间隙都相当大且估计有风时跳线的间隙亦无问题，便可逐塔计算施工线长，否则应按下一步骤检查有风变位后的跳线间隙。

（2）检查有风时的跳线间隙。假设风偏前后跳线长度保持不变（恒为 L_0），利用下式试凑求解各有风校验条件下的悬垂串偏斜角 ϕ_0。

$$
\left.\begin{aligned}
\phi&=\arctan\frac{2T\cos\omega+(0.5G_{\mathrm{H}}+g_4 l_{\mathrm{H}})}{(0.5G_{\mathrm{v}}+p_1 l)+2T\frac{h}{l}}\\
T&=\sqrt{\frac{l^3 g_6^2\cos\beta}{24(L_0-l/\cos\beta)}}
\end{aligned}\right\}\tag{3-254}
$$

式中 ϕ 是隐函数，其中 ω、l、h、β、T 均是 ϕ 的函数，故必须先假设 ϕ 角，算出与它相关的 ω、l、h、T、β，代入上面第一式右侧，解出 ϕ 如果与假设相同，即表示 ϕ_x 假设的正确，否则应重设 ϕ_x 值算至 $\phi_x=\phi$，此时的 T 则为跳线风偏后的张力。另外亦可先假定 3～5 个 ϕ_x，求出相应的 ϕ，作成 $\phi=f(\phi_x, T)$ 曲线，自曲线中查出 $\phi_x=\phi$ 时的 ϕ_x 及 T，即为所求的悬垂串偏角 ϕ 及跳线张力 T。根据已解出的 ϕ、l、T 便可算出 $f_{x\mathrm{v}}$ 及 $f_{x\mathrm{H}}$，做出跳线在正、下视图中的风偏变位位置。检查跳线对构件间隙，若各方间隙不匀称或不足，经分析表明若施工假设偏角 ϕ_0 不适当，可另选 ϕ_0 重复上述计算和检查。有时间隙不足可能是塔头结构尺寸不适当，为了获得较大的间隙，一般可根据具体情况向外延伸跳线悬挂点、采用上悬下拉式固定悬垂串、加长悬垂线夹船体等措施。

（3）计算绕引跳线长度。根据同类塔型中通过间隙校验选定的施工偏距 δ_0（即选定 ϕ_0），逐塔算出跳线两侧的档距与高差，进而算出跳线长度 $\Sigma L=L_{01}+L_{02}+\Delta S$。

【例 3－9】 有一 220kV A 字型转角杆、最小转角 $\psi=10°$，中线绕跳塔头尺寸为：$S=5.12$m，$D=0.6$m、

E=2.5m。导线数据为：LGJ－240、A=281.1mm²、g_1=9.78N/m、$g_{4(18)}$=4.72N/m、$g_{6(18)}$=10.89N/m。耐张绝缘子数据：λ=3.5m、$\theta_A=\theta_B$=10°、ϕ=3°（假定θ、ϕ在各校验条件下不变）。跳线悬垂串数据：ρ=2.3m、G_v=686N，$G_{h(18)}$=84.3N，Δ=0.3m。设跳线悬垂串施工偏角ϕ_0=10°（即δ_θ=0.4m），求解操作过电压时跳线的ϕ、l、T、f_{xv}、l_{xh}。

解 （1）由式（3-244）求l_0、T_0、L_0。

$$l_0=\left\{\left[S-\lambda\cos\theta\sin\left(\frac{\psi}{2}-\varphi\right)-\rho\sin\phi\right]^2+\left[\lambda\cos\theta\cos\left(\frac{\psi}{2}-\varphi\right)+\frac{D-\Delta s}{2}\right]^2\right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$\{(5-0.4)^2+[3.5\times0.985\times0.999+0.15]^2\}^{\frac{1}{2}}$$
$$=\sqrt{4.6^2+3.59^2}=5.84\text{m}$$

$$T_0=\frac{\tan\phi_0(0.5G_v+g_1l_0)}{2\left(\cos\omega_0-\dfrac{h_0}{l_0}\tan\phi_0\right)}$$

式中 $$\cos\omega_0=\frac{S-\delta_0-\lambda\cos\theta\sin\left(\dfrac{\psi}{2}-\varphi\right)}{l_0}=\frac{4.6}{5.84}=0.788$$

$$h_0=(E+\lambda\sin\theta)-\rho\cos\phi_0$$
$$=3.11-2.26=0.85\ (\text{m})$$

则 $$T_0=\frac{0.176(343+57.1)}{2\left(0.788-\dfrac{0.85}{5.84}\times0.176\right)}=46.18\ (\text{N})$$

$$\cos\beta=\frac{1}{\sqrt{1+\tan^2\beta_0}}=\frac{1}{\sqrt{1+\left(\dfrac{0.85}{5.84}\right)^2}}=0.99$$

$$L_0=\frac{l_0}{\cos\beta_0}+\frac{l_0^3g_1^2\cos\beta_0}{24T_0^2}=\frac{5.84}{0.99}+\frac{5.84^3\times9.78^2}{24\times46.18^2}\times0.99$$
$$=6.27\ (\text{m})$$

（2）求解跳线操作过电压条件下的ϕ、l、T、f_x。

设ϕ_x=14°、15°、16°、17°、18°，求对应下的ϕ值，找出$\phi_x=\phi$时的ϕ、l、T，其试凑计算成果见表3-65。

将表3-65成果绘成$\phi=f_1(\phi_x)$、$T=f_2(\phi_x)$、$l=f_3(\phi_x)$曲线，便可查出$\phi=\phi_x$下的T、l，此例$\phi=\phi_x$=16.08°，可近似取接近的整数16°，即悬垂串由施工时的偏角10°变到操作过电压时为16°，跳线张力由46.18N变为38.5N。由表3-65可以看出虽ϕ_x变化幅度很大，而ϕ的变化很小，ϕ_x从小变到大时，ϕ则由大变小，掌握这一规律，很容易试凑出ϕ_0，如先任设一个$\phi_{x1}>\phi_0$的偏角，算出对应下的一个ϕ_1值，若$\phi_{x1}>\phi_1$，可再设ϕ_{x2}略大ϕ_x的整角度（若$\phi_{x1}<\phi_1$则设$\phi_{x2}<\phi_1$），算出ϕ_2，依此规律再选算第三点，一般便可得到近似值，也没有必要解得精确的ϕ值。

从表3-65知：l=5.65m、T=38.5N、g_1=9.78N/m、$g_{4(18)}$=4.72N/m、$\cos\beta$=0.988，算出跳线各点的垂直与水平投影弧垂见表3-66。

表3-65 跳线计算表

公式	项目 \ ϕ_x	14°	15°	16°	17°	18°
$l=\sqrt{\left[S-\lambda\cos\theta\sin\left(\frac{\psi}{2}-\varphi\right)-\rho\sin\phi\right]^2+3.59^2}$	$\rho\sin\phi$	0.556	0.595	0.634	0.673	0.71
	$5-\rho\sin\phi$	4.444	4.405	4.366	4.327	4.29
	l	5.71	5.68	5.65	5.62	5.59
$\cos\omega=(5-\rho\sin\phi)/l$	$\cos\omega$	0.778	0.775	0.772	0.77	0.767
$\cos\beta=\frac{1}{\sqrt{1+\tan^2\beta}}$	$\tan\beta=h/l$	0.1541	0.1568	0.1594	0.1621	0.1647
	$\cos\beta\approx$	0.988	0.998	0.998	0.998	0.998
$T=\sqrt{\frac{l^3g_6^2\cos\beta}{24(L_0-l/\cos\beta)}}$	$l^3g_6^2\cos\beta/24$	908.9	893.5	879	865.6	851.2
	$l/\cos\beta$	5.78	5.755	5.725	5.695	5.665
	$L_0-l/\cos\beta$	0.538	0.563	0.593	0.623	0.653
	T	41.1	39.8	38.5	37.3	36.2
$\tan\phi=\frac{2T\cos\omega+(0.5G_h+g_4l_H)}{(0.5G_V+l)+2T\frac{h}{l}}$ 式中 $0.5G_h+g_4l_H=42.15+16.94=59.1$	$2T\cos\omega$	63.95	61.69	59.44	57.44	55.53
	p_1l	55.84	55.55	55.26	54.96	54.67
	$2Th/l$	12.65	12.45	12.26	12.16	11.96
	$\tan\phi$	0.299	0.294	0.2885	0.284	0.2795
	ϕ	16.65°	16.4°	16.1°	15.86°	15.62°

表 3-66 跳线各点垂直与水平投影弧垂

弧垂类别 \ 弧垂公式（m） \ 计算点	l 中央点	$l/4$ 及 $\frac{3}{4}l$ 点
	$f_{l/2}=\dfrac{l^2 g_x}{8T\cos\beta}$	$f_{l/4}=0.75f_{l/2}$
垂直投影弧垂 f_{xV}	1.025	0.769
水平投影弧垂 f_{xH}	0.495	0.371

将求得的 ϕ、δ、l、f 画于图 3-154 中，便可进行间隙检查作图，图中 $d_0'd_0=f_{1/2\mathrm{v}}$，$d_0d=f_{1/2\mathrm{H}}$。

3. 刚性跳线

刚性跳线与普通软跳线相比，在跳线下侧（三档绕跳中段）增加了一个跳线支撑装置，将跳线固定于支撑架（铝管）上，支撑架（铝管）通过拉杆或跳线绝缘子串连接至耐张绝缘子串或铁塔上，增加了跳线刚性、减小了跳线弧垂。支撑架（铝管）上按需要可加重锤片。

刚性跳线及线绝缘子串偏角计算应计及跳线支撑架影响。

直跳跳线风偏角按下式计算：

$$\alpha=\arctan\frac{nP_4 l+P_C}{nP_1 l+G_C+G_Z} \qquad (3\text{-}255)$$

式中 P_4——跳线单位长度风荷载，N/m；

P_1——跳线单位长度自荷载，N/m；

l——跳线档距，m；

P_C——支撑架，（铝管）风荷载，N；

G_C——支撑架，（铝管）垂直荷载，N；

G_Z——重锤垂直荷载，N；

n——导线分列根数。

刚性跳线当直跳间隙不满足要求或为了减小塔头尺寸，一般采用两组跳线绝缘子串将跳线段分三档，两跳线绝缘子串间的跳线采用支撑架（铝管）固定。

绕引跳线绝缘子串风偏角计算公式为

$$\alpha=\arctan\frac{nT\sin K+P_c/2+P_0/2+nP_4(l/2+l_0/2)}{G_0/2+G_Z+G_C/2+nP_1(l_0/2+l/2+T\sin\beta/P_1)} \qquad (3\text{-}256)$$

式中 T——靠耐张串一侧跳线档张力，N；

P_4——跳线单位长度风荷载，N/m；

P_1——跳线单位长度自荷载，N/m；

P_0——跳线绝缘子串风荷载，N；

G_0——跳线绝缘子串垂直荷载，N；

P_C——支撑架（铝管）风荷载，N；

G_C——支撑架（铝管）垂直荷载，N；

G_Z——重锤垂直荷载，N；

l——靠耐张串一侧跳线档档距，m；

l_0——两跳串间跳线档距，m；

K——跳线与垂直横担直线间的夹角，（°）；

β——跳线高差角，（°）；

n——导线分裂根数。

七、档距中央的绝缘配合

以下所述档距中央的绝缘配合，包括导线相间最小距离的确定及导线和地线间最小距离的确定两部分内容。

（一）导线相间距离

1. 档距中央导线水平相间距离

档距中央导线水平相间最小距离主要取决于较大的风引起的导线不同步摆动（或舞动）的条件，此时正常运行的工频电压不应使相间空气间隙击穿。正常情况下档距中央相导线间电气间隙主要由相间操作过电压确定。由表 3-67 所示各国经验公式可以看出，各公式均有与电压（U）有关的子项。以 500kV 为例，该项数值在 3.33～5.0 范围内。由此可以推断，各国经验公式所要求的空气间隙基本上是操作过电压（加适当裕度）时的空气间隙。美国能源部 1980DOE/ RA12133－10《超高压特高压架空输电线路电气与机械设计规范》第 4.2.3 条指出：“在正常情况下最小相间空气间隙是由操作过电压决定的。”日本东京电力公司编写的《500kV 输电线路设计导则》指出：“导线摆动时的绝缘应能耐受相间操作冲击。”

架空输电线路线（相）间距离涉及电气安全距离及导线因风产生不同步摆动而互相接近等气象状况，因而是一个非常复杂的问题。目前世界各国均无足够的理论和实践依据，一般均采用经验公式。其公式见表 3-67。

表 3-67 各国线间距离计算公式

国别	公 式	国别	公 式
德国、比利时	$D=\dfrac{U}{150}+0.62\sqrt{f+L_k}$	瑞典	$D=\dfrac{U}{150}+0.5\sqrt{f}$
西班牙	$D=\dfrac{U}{150}+0.62\sqrt{f_k}$	芬兰	$D=\dfrac{U}{143}+0.027\dfrac{L_k+10}{\sqrt{d\sigma_0}}$

续表

国别	公　式	国别	公　式
奥地利	$D=\frac{U}{150}+0.9\sqrt{f+L_k}$	苏联	$D=1+\frac{U}{110}+0.6\sqrt{f}$
意大利	$D=\frac{U}{100}+0.5\sqrt{f+L_k}$	美国	$D=0.7L_k+0.0076U+K\sqrt{f}$ 式中：轻、中、重冰区的 K 值分别为：K=0.635，0.662，0.691
荷兰	$D=\frac{U}{125}+0.8\sqrt{(f+L_k)\sin\alpha}$	捷克	$D=0.25+\frac{U}{100}+0.7\sqrt{f}$
波兰	$D=\frac{U}{150}+0.65\sqrt{f+L_k}$	瑞士	$D=0.007U+0.065\sqrt{f}$

注　D—水平线间距离，m；U—线路额定电压，kV；f—导线最大弧垂，m；L_k—绝缘子串长度，m；α—导线最大风偏角，(°)；σ_0—年平均气温下导线应力，$\frac{1}{9.81}$N/mm²；d—导线直径，cm。

GB 50545—2010 及 GB 50665—2011 总结了我国大量线路的运行经验并参照国外公式，提出了计算导线相间水平距离，水平线间距离宜按下式计算：

$$D=k_iL_k+\frac{U}{110}+K\sqrt{f_C} \qquad (3\text{-}257)$$

式中　k_i——悬垂绝缘子串系数，见表 3-68；

D——导线水平线间距离，m；

L_k——悬垂绝缘子串长度，m；

U——输电线路标称电压，kV；

K——系数 1000m 档距以下取 0.65，1000～2500m 取 0.75～0.95；

f_C——导线最大弧垂，m。

表 3-68　k_i 系数

悬垂绝串形式	Ⅰ－Ⅰ串	Ⅰ－Ⅴ串	Ⅴ－Ⅴ串
k_i	0.4	0.4	0

2. 导线垂直排列时相间最小距离

垂直排列时导线的相间距离主要确定于上、下导线覆冰不均匀以及覆冰脱落时的跳跃（或舞动），因此与导线弧垂及冰厚有关。在一般地区，考虑到导线覆冰情况较少，导线发生舞动的情况更为少见，因此，GB 50545—2010、GB 50061—2010 及 GB 50665—2011，推荐导线垂直相间距离可为水平相间距离的 0.75 倍[即按式（3-257）计算结果乘以 0.75]，并对各级电压线路规定了使用悬垂绝缘子串杆塔的最小垂直线间距离值见表 3-69。但这一垂直距离的规定，在有覆冰的地区则嫌不够，尚必须考虑导线间的水平偏移才能保证线路的运行安全，所以规程中又对导线间水平偏移的数值做了相应的规定，见表 3-70。

表 3-69　使用悬垂绝缘子串杆塔的最小垂直线间距离

标称电压（kV）	35	66	110	220	330	500	750	1000
垂直线间距离（m）	2.0	2.25	3.5	5.5	7.5	10.0	12.5	16

表 3-70　上下层相邻导线间或地线与相邻导线间的水平偏移

标称电压（kV）	35	66	110	220	330	500	750	1000
设计冰厚 10（mm）	0.2	0.35	0.5	1.0	1.5	1.75	2.0	—

设计冰厚 5mm 的地区，上下层相邻导线间或地线与相邻导线间的水平偏移，可以根据运行经验适当减小。

3. 导线三角排列时相间最小距离

导线呈三角排列时，其工作状态介乎垂直排列和水平排列之间。GB 50061—2010、GB 50545—2010、GB 50665—2011 建议，当三角排列时导线间的斜向相间距离可化为等效水平相间距离，导线三角排列的等效水平线间距离，宜按下式计算：

$$D_x=\sqrt{D_p^2+(4/3D_z)^2} \qquad (3\text{-}258)$$

式中　D_x——导线三角排列的等效水平线间距离，m；

D_p——导线间水平投影距离，m；

D_z——导线间垂直投影距离，m。

按式（3-258）算出 D_x 值后，代入式（3-257），即可确定允许的导线弧垂（或档距）。

4. 多回路塔相间距离的确定

对于多回路同杆架设的线路，考虑到不同回路间

导线闪络将影响到两个以上回路的供电安全，易使事故扩大，因此，GB 50545—2010 规定，对多回路杆塔的不同回路不同相导线间的水平或垂直相间距离，应比上述单回路不同相导线间所要求的相间距离大 0.5m。GB 50061—2010 也提出了不同导线回路最小距离的具体数值。距此，不同回路导线的相间距离一般不应小于表 3-71 所列数值。

表 3-71 不同回路不同相导线间的最小线间距离

标称电压（kV）	35	66	110	220	330	500	750	1000
垂直线间距离（m）	3.0*	3.5*	4.0	6.0	8.0	10.5	13	16*

* 表中数值是本手册建议值。

5. 导线排列方式改变时最小相间距离

以上关于线间距离的叙述均系指排列方式基本不变的情况。在排列方式有突然变化时，如由原来的水平排列变至邻塔上的垂直排列等，则档距中最接近处的净空距离，就将与相邻两塔上导线的布置以及其他一些因素有关。

根据 GB 50545—2010 规定，海拔不超过 1000m 的地区，对一般档距，在塔头结构布置时，相间操作过电压相间最小间隙和档距中考虑导线风偏工频电压和操作过电压相间最小间隙，不宜小于表 3-72 所列数值。

表 3-72 工频电压、操作过电压相间最小间隙

标称电压（kV）		110	220	330	500	750
工频电压（m）		0.50	0.90	1.60	2.20	2.80
操作过电压（m）	塔头	1.20	2.40	3.40	5.20	7.70
	档距中	1.10	2.10	3.00	4.60	5.40

为了检查两相导线在档距中的最接近间距，基本方法是和前述拉线投影法一样，将其中一根导线 A 看作具有弧垂的拉线，作出与导线 A 相垂直平面内的投影图（A 线投影成一点 a），便可量得 A 线同另一线 B 间的最近间距。顺着一条曲线投影要比顺着一条直线拉线投影繁杂些，故在小弧垂等特定条件下，可将顺视导线 A 简化近似成直线，使之变成同直线拉线一样的投影方法。下面分别介绍近似投影与普遍适用的精确投影方法。

（1）间距近似投影法。

1）当顺视导线 A 两悬挂点间无高差且在两端杆塔上不转角，两线 A、B 的弧垂与档距相比很小（$l \gg f$）的情况下，作图步骤是先绘出两导线在两端杆塔上的正面位置图，如图 3-154（a）、（b）所示。然后顺着导线 A 的悬挂点连线 AA'作投影图（即与 AA'相垂直的平面），它是由两正面图（a）、（b）平行移动使 A 线的两悬挂点 A、A'重合而成，如图 3-154（c）所示。当两线均无弧垂时，图（c）中 BB'直线既是 B 线的悬挂点连线又是它本身的投影位置，A 线则投影为一点 a（A、A'）。当两线对应点的弧垂相同时，由于假设弧垂很小，最近间距近似认为仍发生在垂直于轴线 AA'的平面内，故弧垂相同就近似于无弧垂的情况。在图 3-154（c）中自 a（A、A'）点向 BB'作垂线，垂臂 R 即线间最近距离，其垂足为 m。根据投影成比例的性质能定出接近点在档中的位置。当两线的弧垂不同时，仍可近似地仿照图 3-154（c），取 BB'连线的中点 O，并过 O 作中垂线 $\overrightarrow{OV}$。无风时沿中垂线量取档距中央的弧垂差 $\Delta f = f_b - f_a$（正值向下），如图 3-155（a），以 $\overrightarrow{OV}$ 为重力方向便可作出 B 线的弧垂投影线 $\widehat{BB'}$，R 即为 A、B 线间之最近间距。当既有弧垂差又考虑同向风偏时，如图 3-155（b）所示，自 O 点量风偏角 η，作出合力线 $\widehat{OP}$，自 O 点沿 $\overrightarrow{OP}$ 取 $\Delta f = OF$，以 $\overrightarrow{OP}$ 为重力方向，便可作出 B 线的 $\widehat{BB'}$ 投影位置。

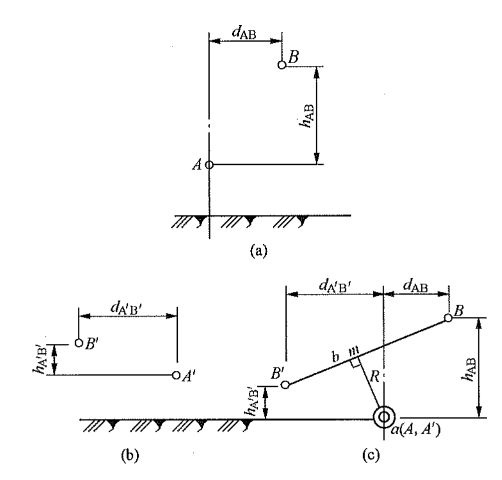


图 3-154 档中导线间距近似投影图（一）

2）当顺视导线 A 两悬挂点间有高差，且两端转角，两线弧垂很小的情况和 1）款情况的作图法一样，但塔头正面图中的悬挂点间水平距离 d_0 和垂直距离 h_0，需根据顺视线 A 的悬挂点高差角 β 及两端的转角 ψ_A、ψ'_A 进行改正。为直观起见，通常用作图法进行改正。如图 3-156 所示，先假定两线无弧垂，画出两线悬挂点连线的下视图（a）和垂直 AA'轴的侧视图（b）（顺视线 A 的 AA'轴位于侧视图平面内），在下、侧视图中即可画出与 AA'轴相垂直的改正后的塔头导线布置投影尺寸 d_{AB}、h_{AB}、$d_{A'B'}$、$h_{A'B'}$。垂线 AA'轴平面的

投影图的作法与图 3-155 的作法相似：当有弧垂差而无风时，图 3-156（c）中$\Delta f'=\Delta f_0\cos\beta$（其中$\Delta f_0$为无风时的 B 线档距中央与 A 线对应点的弧垂差）。当有风时，其投影图如图 3-156（d）所示，图中$\Delta f_V=\Delta f\cos\eta\cos\beta$，$\Delta f_H=\Delta f\sin\eta$（其中$\Delta f$为有风时综合弧垂差，$\eta$为风偏角）。

（2）精确投影法。当导线的弧垂较大时，即使两线对应点的弧垂相同，线间最近间距亦不能再假设发生在与顺视导线 A 的悬挂点连线 AA' 相垂直的平面内，否则将产生较大误差。

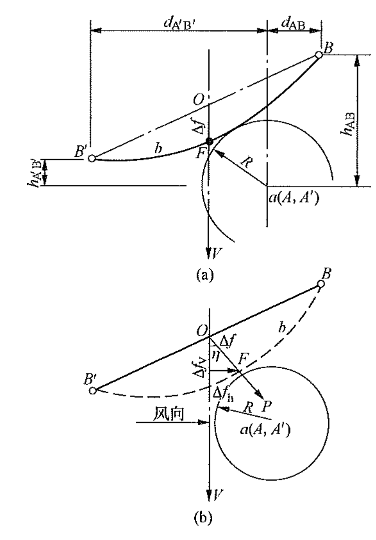


图 3-155　档中导线间距近似投影图（二）

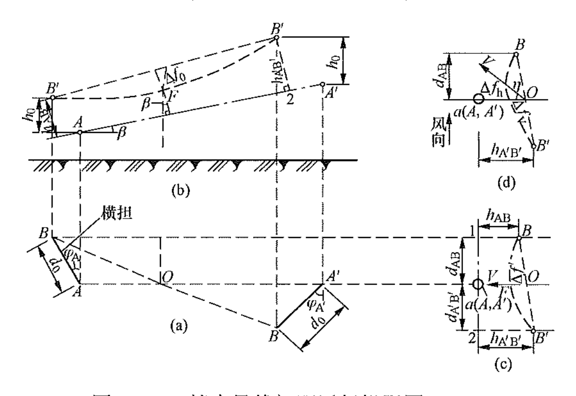


图 3-156　档中导线间距近似投影图（三）

（a）下视图；（b）侧视图；（c）垂直 AA' 轴平面的投影图（无风时）；（d）垂直 AA' 轴平面的投影图（有风时）

应该作出与导线 A 相垂直的投影图，而 A 线本身又是曲线 $\overset{\frown}{AA'}$，需要在档内 A 线的几个点上作垂直 A 线的“垂切面图”，然后将数个垂切面图对应重合在一起，即可变成与 A 线相垂直的平面投影图，如图 3-157 中的图（c）所示。图中 A 弧线变成一点 a（A、A'），B 弧线变成 a（A、A'）点附近的一投影曲线。图 3-157 所示为两线间既有高差、转角，又有较大弧垂、无风情况下的精确作图法。

（二）导线和地线间最小距离

线路档距中央导线和地线间的最小距离应按雷击档距中央地线时不致使二者间的间隙击穿来确定。其最小安全距离与雷电流陡度、档距长度及导线和地线间的耦合系数等有关。对于一般档距，由于其档距长度不很大，当雷击档距中央地线时，在雷电流未达到最大值之前，从杆塔接地装置反射回来的负波已达到雷击点，因而限制了雷击点的电位升高，使档距中央导、地线间的间隙不易击穿。

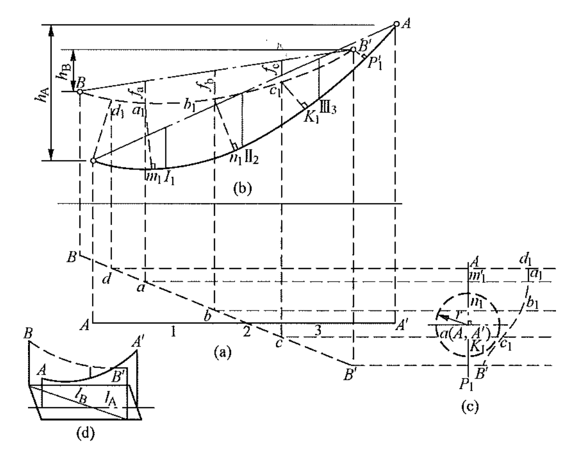


图 3-157　档中导线间距精确投影图

（a）下视图；（b）AA' 曲线平面正视图；（c）与 AA' 线垂直平面的投影图；（d）立体示意图

根据我国大量的运行经验，GB 50545—2010 提出一般档距的档距中央，导线与地线间的距离，应按式（3-248）校验（计算条件为：气温 +15℃，无风、无冰）。

$$S\geqslant 0.012L+1 \tag{3-259}$$

式中　S——导线与地线间的距离，m；

L——档距，m。

GB/T 50064—2014 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范提出：

1）220kV 及以下的输电线路，15℃无风时档距中央导线与地线间的最小距离宜按式（3-260）计算：

$$S=0.012L+1 \tag{3-260}$$

2）220kV 以上的输电线路，15℃无风时档距中央导线与地线间的最小距离宜按式（3-261）计算：

$$S=0.015L+1 \tag{3-261}$$

这里应该说明的是，根据瓦格纳和希尔曼的管－管预击穿电流理论，当导线与地线之间的冲击电压进入击穿范围时，两线之间就突然出现一层预击穿电流。预击穿电流可多少减低一些过电压，因而造成明显的击穿时

延，使得间隙击穿不是发生在经典理论值的 1 或 2μs，而是发生在 5μs 或更长的时间。这样，即使在档距远大于 $L=v\tau_t=225\times2.6=585$m（$v$ 表示波的传播速度、取 v=225m/s，τ表示波头长度）的情况下，反射波仍来得及从邻塔返回，以降低档距中央导线与地线间的电压，使间隙不易击穿。因此不管采用上述那个公式，档距 $L=v\tau_t$ 的条件均可适当放大。

八、塔头规划设计程序

塔头间隙尺寸及档距中央导线间和导线与地线间距离确定之后，即可完整地进行塔头型式及尺寸的规划，其设计流程如图 3-158 所示。

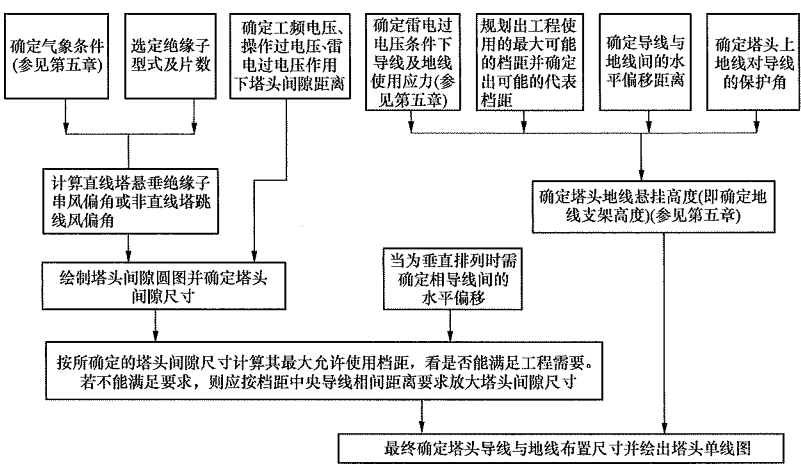


图 3-158 塔头规划典型设计流程图

在实际工程中，为经济起见，一般均选几种型号的直线塔以分别用于各种不同条件，因此，在塔头规划中应分别选定大小不同的几种悬垂绝缘子串风偏角，规划出不同尺寸的塔头。特别应该注意的是，对于大山区的线路，往往需要跨越一些大的山谷，因此，尚应考虑一种允许使用档距甚大的杆塔，这时，其塔头尺寸就不一定是由塔头间隙圆确定，而可能是由档距中央导线相间最小允许距离确定。

第九节 防雷保护与接地

一、雷电参数

（一）雷暴日与雷暴小时

在进行防雷设计和采取防雷措施时，必须考虑到该地区的雷电活动情况。某一地区的雷电活动频度，可用该地区的雷暴日或雷暴小时来表示。雷暴日是一年中有雷电的日数。雷暴小时是一年中有雷电的小时数。一天或一小时内只要听到雷声（不管听到几次），就记为一个雷暴日或雷暴小时。由于各年的雷暴日（或雷暴小时）变化较大，所以应采用多年的平均值。

我国采用雷暴日作为计算单位。各国气象单位及设在日内瓦的世界气象组织所提供的指标也是雷暴日数。但有人认为，雷暴日不能区别雷暴的持续时间及强烈程度，因而主张采用雷暴小时作为计算单位。《电气装置的过电压保护》列出了我国雷暴日与雷暴小时之间的关系，见表 3-73。

表 3-73 我国雷暴日与雷暴小时的比值

年平均雷暴日数	雷暴小时数/雷暴日数
20～25	2.2～3.0
30～40	2.5～3.5
50～60	3.0～4.0
70～80 及以上	3.3～4.3

由表 3-73 可以看出，雷暴小时数与雷暴日数之比随雷暴日数增加而增大。大致看来，二者的比值在 3.0 左右。

《过电压及保护》指出，雷暴日的多少和纬度有关。以一般平均值来说，赤道地带约 100～150 雷暴日，热带约 75～100 雷暴日，中纬度地区约 30～50 雷暴日，而在极圈附近只有几个雷暴日。我国北回归线（北纬 23.5°）以南一般在 80 雷暴日以上（但台湾省只有 30 雷暴日左右），北纬 23.5° 到长江一带约 40～80 雷暴日，长江以北大部分地区（包括东北）约 20～40 雷暴日。西北地区多数在 20 雷暴日以下。西藏因印度洋暖流沿雅鲁藏布江上溯，很多地方雷暴日高达 50～80。一般把年平均雷暴日不超过 15 日的地区叫少雷区，超过 40 日的叫多雷区，超过 90 日的叫强雷区，在防雷设计上要因地制宜区别对待。

（二）地面落雷密度

雷暴日或雷暴小时虽反映出该地区雷电活动的频度，但它未能反映出是云间放电或是云对地放电。测试表明，云间放电远多于云对地放电，二者之比，在温带为 1.5～3.0，在热带为 3～6。最关心的还是云对地的放电，也就是地面落雷。

地面落雷密度用γ［次/（km²・雷暴日）］表示。它表示每一雷暴日、每平方千米地面落雷次数。地闪密度定义为：每年每平方千米遭雷击的次数，次/（km²・a）；GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》推荐对年平均雷暴日数为 40d 的地区可取 2.78 次/（km²・a），相应的γ值为 0.0695。

为精确掌握地面落雷特性，20 世纪 80 年代末我国电网即在国内率先开展了利用雷电定位系统（LLS）对雷电活动进行监测的工作。2006 年形成了覆盖全国电网和绝大部分国土面积的全国雷电监测网。LLS 是一套全自动、大面积、高精度、实时雷电监测系统，能实时遥测并显示云对地放电（地闪）的时间、位置、雷电流峰值和极性、雷击次数以及每次雷击的参数，雷击点的分时彩色图能清晰显示雷暴的运动轨迹。

《电气装置的过电压保护》列出了一些国外的地面落雷密度γ［次/（km²・雷暴日）］数据，现开列如下，可供设计参考。

苏联，0.09；

加拿大（H.Linck），0.15；

奥地利（普润提斯），0.13；

德国（按磁钢棒记录），0.2；

美国（Hagengath），0.09；

美国（超高压输电设计），0.1；

英国，0.19。

（三）雷电流的幅值

雷电流是指雷击于接地良好的目标时泄入大地的电流。雷电流的幅值（I）与气象及自然条件有关，是一个随机变量，只有通过大量实测才能正确估算其概率分布的规律。GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》建议雷电流幅值的概率值按下式计算。

$$P(I_0 \geqslant i_0) = 10^{-\frac{i_0}{88}} \tag{3-262}$$

式中 $P(I_0 \geqslant i_0)$——雷电流幅值超过 i_0(kA) 的概率。

应该说明，式（3-262）仅适用于我国年平均雷暴日大于 20 的地区。对于年平均雷暴日小于 20 的地区，如陕南以外的西北地区及内蒙古自治区的部分地区等，由于其雷电流幅值较小，GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》建议由下式计算。

$$P(I_0 \geqslant i_0) = 10^{-\frac{i_0}{44}} \tag{3-263}$$

测试表明，雷电流幅值与海拔及土壤电阻率的大小关系不大。

（四）雷电流的波形、陡度和波头长度及其与雷电流幅值的关系

由各国所测得的雷电流波形来看，基本上出入不大。波长τ大致在 40μs 左右。波头长度τ_t大致为 1～4μs，平均在 2.6μs 左右。因此，GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》规定，架空线路雷电性能计算时可采用雷电流波形为 2.6/50μs 的双斜角波。

既然波头长度（τ_t）变化不大，所以，雷电流波头陡度$\left(a = \dfrac{di}{dt}\right)$和雷电流幅值必然是密切相关的。根据 GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》推荐，在线路防雷设计中，波头形状可简化取为斜角波。若波头长度取为 2.6μs，则斜角波波头的平均陡度为

$$a = \frac{di}{dt} = \frac{I}{2.6} \tag{3-264}$$

用斜角波进行线路的防雷计算，对于一般线路杆塔（如塔高在 40m 以下时）来说是可行的，但对于特殊高塔来说，采用半余弦波头则更符合实际且偏于安全。因此，建议在设计特殊高塔时，可采取半余弦波形。

对于半余弦波形，其表达形式可写为

$$i = \frac{I}{2}(1 - \cos\omega t) \tag{3-265}$$

若将式（3-265）中的 ω 用波头长度τ_t来代替，则

$$\omega = 2\pi f = 2\pi\frac{1}{T} = \frac{2\pi}{2\tau_t} = \frac{\pi}{\tau_t} \tag{3-266}$$

将式（3-266）代入式（3-265），则得

$$i = \frac{I}{2} \times \left(1 - \cos\frac{\pi t}{\tau_t}\right) \tag{3-267}$$

式中 I——雷电流幅值，kA；

t——时间，μs。

其最大陡度与平均陡度为

$$a_{max} = \left(\frac{di}{dt}\right)_{max} = \frac{I}{2}\omega = \frac{I\pi}{2\tau_t} \tag{3-268}$$

$$a_{av} = \left(\frac{di}{dt}\right)_{av} = \frac{I}{\pi} \times \omega = \frac{I}{\pi} \times \frac{\pi}{\tau_t} = \frac{I}{\tau_t} \tag{3-269}$$

由此可知，在半余弦波情况下雷电流的最大陡度为平均陡度的 $\dfrac{\pi}{2}$ 倍。

半余弦波与斜角波波形如图 3-159 所示。

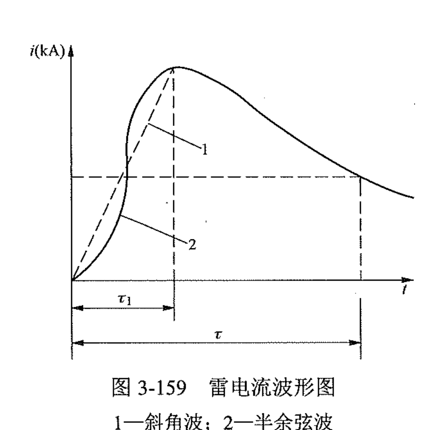


图 3-159 雷电流波形图
1—斜角波；2—半余弦波

二、输电线路上的雷电过电压

根据过电压形成的物理过程，雷电过电压可以分为两种：①直击雷过电压：雷电直接击中杆塔、避雷线或导线引起的线路过电压；②感应雷过电压：雷击线路附近大地，由于电磁感应在导线上产生的过电压。

雷击现象虽然十分复杂，但从分析其后果的角度看，又可简单地将其看成是一个电流行波沿空中通道注入雷击点，如图 3-160 所示。在击中电线后即分为左右两路继续前进。伴随着电流行波一同前进的还有电压行波，它们构成了以接近光速而传播着的电磁波。

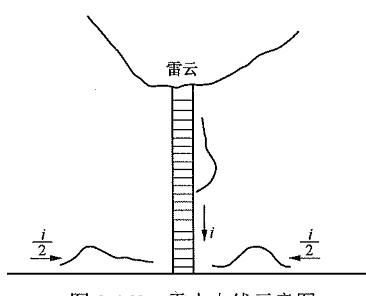


图 3-160 雷击电线示意图

电压行波 u 和电流行波 i 的比值 $Z_0=u/i$，就是该通道的波阻抗，一般取 300Ω。对于导线或避雷线，它大约为 300～400Ω。苏联科学家通过观测和分析得出雷电通道的波阻抗值 Z_0 在 300～3000Ω间变动。雷电流小于 5kA 时，Z_0 值约为数千欧；雷电流处在 5～30kA 范围时，Z_0 值为 900～600Ω；在大电流范围(30～200kA)内，Z_0 值比较稳定，约为 300～600Ω。Z_0 随雷电流幅值变化的规律可按照图 3-161 确定，此图即为 GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》建议的雷电通道等值波阻曲线图。

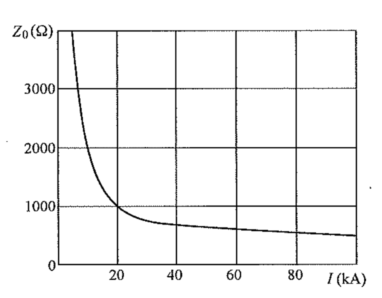


图 3-161 Z_0 随雷电流幅值变化的规律

（一）雷击杆塔塔顶

在雷击塔顶时，由于塔脚接地电阻 R 很小，于是就出现反射现象。如果 $R=0$，则无论如何塔顶都不会出现对地电压。这时随同电流波一同侵入的电压行波，就只好改变其极性后再由原通道反射回去，才能正、负抵消，保证塔顶的零电位状态。但伴随这个向回反射的电压行波还有一个电流行波返回去。由于 $R=0$，电流将发生正的全反射，其结果相当于二倍的电流叠加在一起，如图 3-162 中箭头所示。故从被击物看来，电压消失了，电流增加了一倍。

当然，实际上 R 不等于零，故这种转化也不会十分完善，而且，这时 R 上的压降还要使地线对地获得一个电位，从而于其上出现电压行波（见图 3-162），它还要伴随一个电流行波 $i=u/Z_0$。后者标志着在这种实际情况下地线的分流作用。但通常 R 只有 1～20Ω，这些因素毕竟是次要的。故一般当将地线的分流计入后就认为电流基本上还是增了一倍。

由于雷电流一般都是在塔上测出的，已经将这种理论上的反射包括在内，所以，一般所测的雷电流(I)，包括目前常用的雷电流概率计算公式所示数值，都指的是这个结果，即 $I=2i$，因此，在考虑雷击导线（或雷击于档距中央）时，应首先将这电流值减半，才算将其折算到同一个基准之上。

由于平行导线之间存在着互感和线间电容，因此，一旦在地线上出现电压（必然伴随一个电流）行波时，在相导线上就要耦合出一个相应的电压，如图 3-162 所示。真正作用在绝缘子上的电压乃是它们二者之差，即 $u_t-u=u_t(1-k)$，耦合系数 k 通常为 0.2 左右。耦合作用使绝缘所受到的电压低于塔顶电位 u_t。在没有电晕的情况下，耦合系数不难根据电线的几何尺寸算出，故有时被称为几何耦合系数，在此基础上再考虑电晕影响的修正。

雷电所引起的高电压使电线产生电晕，在雷击电线档距中央时尤为突出。电晕作用大的时候就使电波传播过程大为复杂，耦合系数会因之增大，而波阻抗 $\left(Z=\sqrt{\dfrac{L}{C}}\right)$ 和波速（$v=1/\sqrt{LC}$）则因之有所下降，

其原因为电晕仿佛扩大了电线直径，因而增大了其电容效果，但电晕层又并非真的能够导流，故对电感又影响不大。在图 3-162 中，出现在地线上的行波反映出它的分流作用。当这个行波到达邻塔时，由于又遇到一个低的接地电阻，又要发生反射。这样往复反射，使得在分析中面临了要处理一连串行波的叠加问题。为了避免这个麻烦，通常在近似的计算中就忽略地线上的分布电容$\left(波阻 Z_0=\sqrt{\frac{L}{C}} 则将分布电容考虑在内\right)$，而只考虑其电感。这个电感 L_g 很容易根据地线的波阻 z 和波速 v 以及档距长度算出，因为单位长度的电感 $L=\frac{z}{v}$ 之故。同样，当雷电流经塔身注入塔脚电阻时，也要碰到实际上系分布的电感和电容，但在近似的分析中，也只用一个集中电感 L_t 来代替。于是就得到雷击塔顶时的近似等价图，如图 3-163 所示，其中 i_t 是塔身电流，而 u_{tp} 是塔顶电位。对于通常的杆塔高度和通常的接地电阻（一般 $R\geqslant10\Omega$），杆塔电感影响不大，但对于高塔，L_t 的作用就比较突出，这是高塔的特殊性之一。

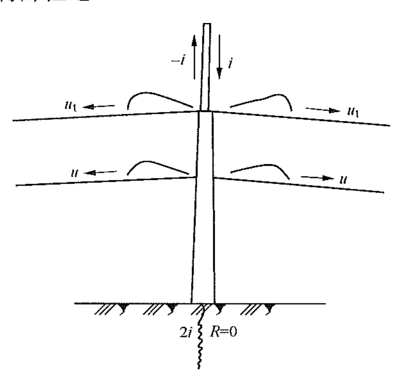


图 3-162　雷击杆塔后波过程示意图

高塔的另一特殊性，是在相同的保护角下，绕击导线的机会可能要大一些，需要更加重视保护角的问题。

利用近似的等价图见图 3-163，当给定雷电流 i 的数值及其波形，就可以算出塔顶电位 u_{tp}，再乘上考虑耦合的系数（1–k），就是实际作用于导线绝缘上的电压（此外还有一个静感应电压，详见后述）。如果它超过绝缘子的 50%闪络电压，那就可以认为要造成闪络了。雷电对线路放电引起绝缘闪络时的雷电流临界值，称作线路的耐雷水平（I_1）。

但是当雷电流超过线路的耐雷水平时，虽然会导致一次雷电闪络，却并不一定意味着是一次故障。只要在雷电过程迅速消逝后，在闪络点不随之建立工频电弧，就仍然可以照常供电。雷电闪络后是否会使工频电流乘虚而入，这是一个概率问题，通常用建弧率来表示。它是一个随机变量，与单位长度的绝缘上实际作用着的工频电压有关，也就是同绝缘的工作电场强度有关，这个电场强度越大，建弧的机会也越大。

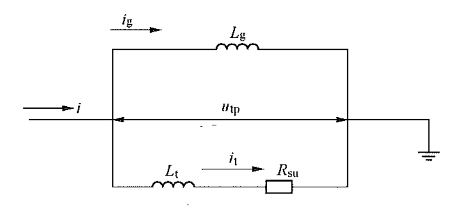


图 3-163　雷击杆塔时等值阻抗图

除耐雷水平外，表征线路耐雷性能的另一个指标就是遮断次数，它是假定在每年 40 个雷电日的情况下，每百千米线路每年因雷害而可能跳闸的次数，它可用来衡量不同设计方案的相对优劣，并不能代表线路实际运行中真实遮断情况。

当将雷击简单地视为一个电波沿雷电通道侵入时，还有一个属于静电感应的现象没有考虑到。在主放电（即雷电波侵入被击物）以前，雷云和从雷云缓慢地向地面延伸的先驱通道中都大量的积存了电荷（一般为负电荷），如图 3-164 的上半部所示。这个电荷使其周围的空间产生了静电场。悬挂在这个静电场之中的导线也就因之要获得一个对地电位，基本上与导线的悬挂高度成比例。但实际上导线又延伸得很远，而且绝缘子也并非完全没有漏泄，故受上述静电场影响的那段导线，可以从远方（或经绝缘子的漏泄而直接从大地）吸入一些相反的电荷（一般为正电荷）。这个被感应出的电荷也要使导线获得一个电位，而且基本上应抵消掉前述静电场所赋予的电位，这是因为这个过程发展得十分缓慢，以致线上的电荷移动速度（也就是电流值）很小，整根导线仍然应处在零电位状态之故（不考虑系统的工作电压）。在主放电的一瞬间，空中电荷被急剧中和，原有的静电场迅速消失，导线上原被束缚的感应电荷很快被释放出来开始以行波的形式向两侧逸去。这部分多余的电荷使导线上多了一个电压 u_g，称为感应电压，其作用是使绝缘子电压有所增加，因为，若空中原为负电荷，则侵入的雷电流应为负极性，它使塔顶对地电位为负，而这时导线上的感应电荷却是正的，它使导线获得正电位，从而加大了两者的差别。而且，主放电时的雷电流的陡度愈大，标志着雷道中电荷被中和的速度愈快，这个感应电压也就会越高，但悬挂在导线之上的地线，由于它对静电场的屏蔽作用，则要使导线上的感应电压有所降低。通常在雷击塔顶的情况下，感应电压在数值级别上约与地线的耦合作用相当，但在极性上却是互相

抵消的。至于在雷击导线或地线于档距中央时，由于雷电流所产生的电压很高，也就不再需要将其计入了。另外，当杆塔很高时，在主放电以前，从塔头也会发展出一个先驱导向雷云方向（见图 3-164），截住了来自上方电荷的电力线，从而显著降低了导线上所感应出的静电荷，使感应电压降低很多，因而在高塔的某些计算中也就不予考虑。

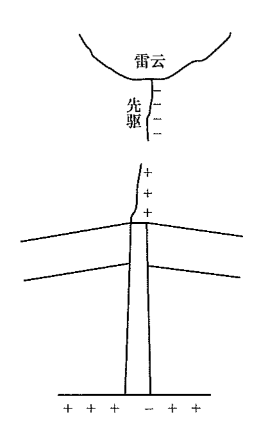


图 3-164　雷击高杆塔时先驱放电示意图

（二）雷电绕击导线

线路运行经验、现场实测和模拟试验均证明，雷电绕过地线直击导线的概率与地线对边导线的保护角、杆塔高度以及线路经过地区的地形、地貌、地质条件有关。

避雷线的保护作用，主要也就在于利用上述原理将电压转化为电流，经很低的塔脚电阻排泄出去，从而达到了大幅度降压目的。如若 $R=10\Omega$，则当雷击塔顶或其邻近的地线上时，塔身电位即使忽略地线的分流，也不过只有 $IR=10I$。如果进一步忽略其他一些基本上可以互相抵消的次要因素（感应电压和耦合作用），这也就是作用在每相导线绝缘上的电压。然而，同一次落雷，若击中导线，通道阻抗 Z_0 取 300Ω，电压就要高达 $\frac{1}{2}\times\left(\frac{I}{2}\right)\times Z_0\approx\frac{300}{4}I=75I$，相差达 7～8 倍之多。

很明显，地线的降压作用，完全是依靠低的接地电阻来实现的，而且接近于成比例关系。此外，当然还应保证雷电不致绕过地线而直接命中导线。所谓绕击率就是指绕过地线而击中导线的概率，它随保护角 α（见图 3-165）的减小而迅速下降。α 系指塔头上的数值，对于单根地线，不同的相导线可能有不同的保护角，而对于如图 3-165 所示对称的双地线，却只需考虑边导线，因中导线位于两地线中央，一般是能很好地被屏蔽着的。

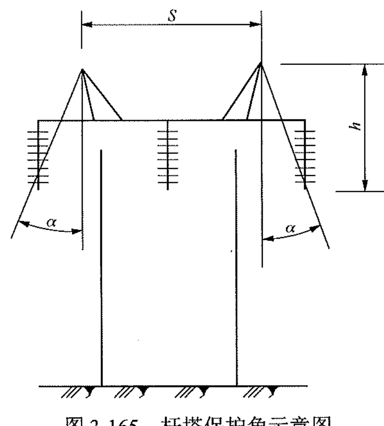


图 3-165　杆塔保护角示意图

（三）雷击档距中间

关于雷击地线档距中央的问题，目前沿用的概念仍然是将导线和地线档距中央的距离视为一个空气间隙，雷击于档距中间的避雷线，雷击点会出现较大的过电压，当超过空气间隙的绝缘强度时，将发生避雷线与导线间的闪络，为了避免闪络，则要求档距中间避雷线与导线间应保持足够的空气距离。适当估计其耐压能力（原 DL/T 620—1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》的估计值为 700kV/m），再与雷击档距中央时的电压相比较，据以确定足以避免闪络所需要的尺寸。雷击档距中央时的电压，开始时是由雷电流和地线波阻所确定，即 $u_g=\frac{1}{2}\times\left(\frac{i}{2}\right)\times Z_g$；其后，即在行波往返半个档距所需的时间以后，由于从两端塔脚返射回来的负波到达档距中央，再叠加上这个反射波就得到后一阶段的电压。档距短时反射回来快，电压就低，需要的距离就小，反之就要大。现行规程的有关规定基本上就是以这一设想为基础的。运行经验证明，按这种规定设计的线路，运行情况还是良好的。

三、输电线路的防雷保护计算

（一）线路雷击次数及击杆率

1. 线路雷击次数

线路雷击次数与雷暴日、地面落雷密度（γ）以及线路遭受雷击的面积（等值受雷面积）有关。

根据 GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》，每年每百千米线路的落雷次数为

$$\begin{aligned}N_L&=\gamma\times\frac{(28h_t^{0.6}+b)}{1000}\times 100T\\&=0.1\gamma T\times(28h_t^{0.6}+b)\\&=0.1N_g(28h_t^{0.6}+b)\end{aligned}\tag{3-270}$$

式中　N_L——每年每 100km 线路的落雷次数，次/(100km·a)；

γ——地面落雷密度，次/（km^2·雷暴日）；

T——年平均雷暴日数；

h_t——杆塔高度，m；

N_g——地闪密度，次/（km^2·a），年平均雷暴日数为 40d 的地区可取 2.78 次/（km^2·a）；

b——两根地线之间的距离，m。

2. 击杆率

击杆率 g 是指雷击线路杆塔的次数与线路雷击总次数之比值。击杆率 g 的大小与地形有关。GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》推荐的击杆率，平原为 1/6，山区为 1/4。

（二）输电线路绕击率计算

为防止雷直击于导线，高压线路一般均加挂地线，但地线对导线的防护并非绝对有效，仍存在一定的雷绕击导线的可能性。

目前，用地线防止雷绕击于导线的计算方法基本上可分为以下几类，一类是如原 DL/T 620—1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》及苏联规程所用的方法，可以叫作经验法；另一类则是 20 世纪 60 年代发展起来的电气几何模型法（也称击距法），GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》、GB/Z 24842—2009《1000kV 特高压交流输变电工程过电压和绝缘配合》推荐采用此种方法；还有一类为先导发展模型法。

1. 电气几何模型法

电气几何模型法（EGM）是用几何模型来分析地线对直击雷的屏蔽作用的一种方法。它是以闪击距离 r_s 的概念为基础所建立的一种新的屏蔽理论。该方法在美、日等国已用于超高压输电线路的设计中，我国特高压设计中也采用了此种方法。电气几何模型法可用下列公式计算

$$r_s = 10I^{0.65} \tag{3-271}$$

$$r_c = 1.63\times(5.015I^{0.578} - 0.001U_{ph})^{1.125} \tag{3-272}$$

$$r_g = \begin{cases} [3.6+1.7\ln(43-h_{c.av})]I^{0.65} & (h_{c.av} < 40m) \\ 5.5I^{0.65} & (h_{c.av} \geqslant 40m) \end{cases} \tag{3-273}$$

式中 r_s——雷电对地线的击距，m；

I——雷电流幅值，kA；

r_c——雷电对导线的击距，m；

U_{ph}——导线上工作电压瞬时值，kV；

r_g——雷电对大地的击距，m；

$h_{c.av}$——导线对地平均高度，m。

上文所列的击距公式由 GB/Z 24842—2009《1000kV 特高压交流输变电工程过电压和绝缘配合》、GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》所推荐，但在不同文献中的取值差异较大，部分学者给出的击距参数取值见表 3-74。

表 3-74 部分击距参数

文献提供者	年份	A	b	K_g
Wagner 等	1961	14.7	0.42	1
Young 等	1963	27（h<18m） 27×444/（462−h）（h>18m）	0.32	1（h<18m） （462−h）/444（h>18m）
朱木美	1965	7.54	0.6932	1
Armstrong 和 Whitehead	1968	6.72	0.8	0.9
Brown 和 Whitehead	1969	7.1	0.75	0.9
Love	1973	10	0.65	1
Whitehead	1974	9.4	0.67	1
J. G. Anderson	1982	8	0.65	0.64（特高压线路）； 0.8（超高压线路）； 1（其他线路）
IEEE 工作组	1985	8	0.65	0.64（特高压线路）； 1（低电压线路）
Mousa 和 Srivastava	1990	8	0.65	1
Taniguchi 等	2010	$(0.338v_1)^{1.43}$ （v_1 为回击速度与光速比）	1.43	1.1
IEEE 1243—1997	1997	10	0.65	0.36+0.17×ln（43−h）（h<40m）； 0.55（h≥40m）
IEEE 998—1996 IEEE 998—2012	1996 2012	8	0.64	不详

注 对电线击距：$r_c = AI^b$，对地面击距：$r_g = K_g r_c$。

图 3-166 是线路的横断面图，显示了雷直击有地线线路导线的电气几何模型。S 点是地线，C 点是导线，AA'为杆塔中心线，θ是线路地线对导线的保护角。若雷电先导头部落入 AB 弧面，放电将击向地线，使导线得到保护，称弧 AB 为保护弧。若先导头部落入 BD 弧面，则击中导线，称弧 BD 为暴露弧。若先导头部落入 DE 平面，则击中大地，故称 DE 平面为大地

捕雷面。随着雷电流幅值增大，暴露弧 BD 逐渐缩小，当雷电流幅值增大到最大绕击导线电流 I_{max} 时，暴露弧 BD 缩小为 0，即不再发生绕击。图中 ψ 是雷电先导入射角。

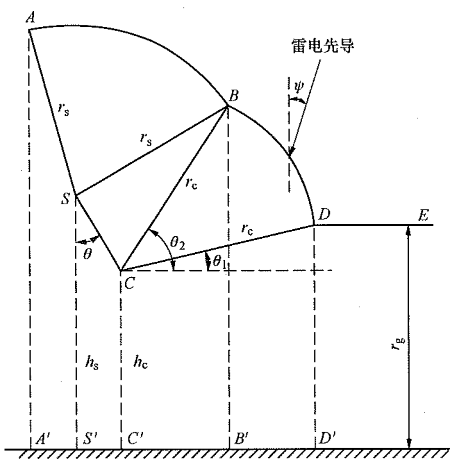


图 3-166 雷电直击线路导线的电气几何模型

当假设雷电垂直射入地面时，线路屏蔽失效并且引起闪络的次数可表示为

$$N_{sf} = 2N_g \times 10^{-1} \times \int_{I_{min}}^{I_{max}} B'D'(I) \cdot f(I) \mathrm{d}I \qquad (3\text{-}274)$$

式中 N_{sf} ——线路屏蔽失效且引起闪络的次数，次/（$100\text{km}^2 \cdot \text{a}$）；

N_g ——地闪密度，次/（$\text{km}^2 \cdot \text{a}$）；

$B'D'(I)$ ——BD 暴露弧的地面投影距离，m，是雷电流 I 的函数；

$f(I)$ ——雷电流幅值概率密度，1/kA；

I_{min} ——能引起导线绕击闪络的最小雷电流，kA；即绕击耐雷水平。

对于较高杆塔先导入射角的概率分布密度函数 $P_g(\psi)$ 可按下式计算

$$P_g(\psi) = 0.75\cos^3(\psi) \qquad (3\text{-}275)$$

考虑先导入射角时，得到给定电流 I 下暴露弧在地面上的投影距离为

$$B'D'(I) = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\psi_{min}}^{\psi_{max}} r_c(I)\sin(\theta) \left| P_g(\psi) \right| \mathrm{d}\psi \mathrm{d}\theta \qquad (3\text{-}276)$$

式中 ψ_{min} ——可击中暴露弧的最小入射角；

ψ_{max} ——可击中暴露弧的最大入射角。

经过山区的输电线路，雷电绕击的计算应计及地形的影响。

GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》推荐雷电为负极性时，绕击耐雷水平 I_{min} 可按下式计算

$$I_{min} = \left(U_{-50\%} + \frac{2Z_0}{2Z_0 + Z_c} U_{ph} \right) \frac{2Z_0 + Z_c}{Z_0 Z_c} \qquad (3\text{-}277)$$

式中 I_{min} ——绕击耐雷水平，kA；

$U_{-50\%}$ ——绝缘子负极性 50%闪络电压绝对值，kV；

Z_0 ——闪电通道波阻，Ω；

Z_c ——导线波阻抗，Ω。

电气几何模型的另外一个实现方式为滚球法（Rolling Sphere Method），滚球法和电气几何模型原理类似，其将电气几何模型平面二维的计算扩展到了三维空间。在滚球法中，将雷电的击距假设为一个以击距为半径的球体。滚球法目前主要用于变电站或建筑物中防雷的分析。此处不进行详细介绍，有兴趣的读者可查阅相关文献。

2. 经验法

原 DL/T 620—1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》根据线路运行经验、现场实测和模拟实验提出了平原和山区线路雷电绕过避雷线直击导线的绕击率计算公式。

平原线路 $$\lg P_\theta = \frac{\theta\sqrt{h}}{86} - 3.9 \qquad (3\text{-}278)$$

山区线路 $$\lg P'_\theta = \frac{\theta\sqrt{h}}{86} - 3.35 \qquad (3\text{-}279)$$

式中 P_θ、P'_θ ——平原、山区线路的绕击率；

θ ——杆塔上地线对外侧导线的保护角，（°）；

h ——地线在杆塔上的悬挂点高度，m。

由式（3-278）、式（3-279）可以看出，山区线路的绕击率约为平地线路的 3 倍，或相当于保护角增大 8° 的情况。

当采用两根地线时，杆塔上两地线间的距离不应超过导线与地线间垂直距离的 5 倍。

3. 先导发展模型法（LPM）

先导发展模型法（LPM），是基于雷电观测和长间隙放电研究成果而建立的一种雷击过程物理仿真模型，其对雷击过程的描述为：雷电先导从雷云向地面发展过程中，地面物体附近的空间电场逐渐加强，当电场增大至一定程度时，地面体会产生上行先导，上行先导朝着雷电先导方向运动，当雷电先导与上行先导（或未产生上行先导的物体、大地）之间达到最终跃变条件时，发生放电击穿并形成主放电通道，确定雷击目的物。成为击中点的物体也可能不产生上行先导，只要下行先导与该物体间的平均场强超过临界击穿场强值，雷击就会对该物体发生。输电线路雷击过程示意如图 3-167 所示。

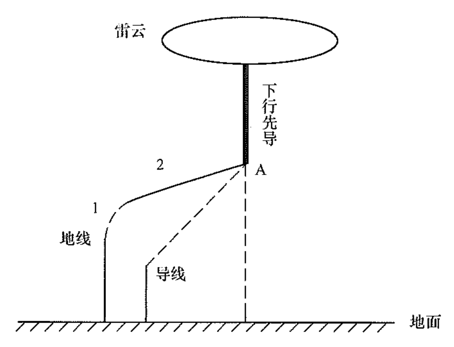


图 3-167 输电线路雷击过程示意图
1—地线上产生的上行先导；2—先导最后跃变；
A—雷击发生时下行先导位置

先导发展模型法较 EGM 更贴近雷击放电物理机制，它充分考虑了雷电放电发展过程中的空间电场变化，对评估超／特高压输电线路雷电屏蔽性能具有重要参考价值，近年来愈加受到国内外学者的青睐。尽管 LPM 具有先进性和发展前景，但现有模型中一些关键判据参数的建立及应用研究方面尚不成熟。这些判据参数和应用条件难以直接通过实验得出，而一般由小间隙的实验结果外推至大间隙情况，考虑的因素亦不全面，且采用不同的参数和判据对线路雷电屏蔽性能的预测结果影响非常大。本手册仅对其进行简要介绍，有兴趣的读者可查阅相关文献进一步研究。

（三）输电线路的感应过电压计算

感应过电压的产生是由于充电的雷云在架空线上感应出电荷，当雷云放电时，架空线上的电荷很快地释放，形成电压与电流波。

1. 雷击线路附近大地时，线路上的感应过电压计算

当雷击输电线路附近地面时，由于电磁感应会在架空输电线路三相导线上产生感应过电压。感应过电压包括静电和电磁两个分量。由于主放电通道与导线是互相垂直的，所以互感不大，即电磁感应不大。因此，电磁分量要比静电分量小得多。同时，又由于两个分量出现最大值的时刻也不同，所以，在对总的感应过电压幅值的构成上，静电分量起主导作用。

在距电力线 $S>65$m 处雷云对地放电时，在电力线的导线上产生的感应过电压最大值可按下式计算

$$U_i \approx 25\frac{I \cdot h_{av}}{S} \tag{3-280}$$

式中 U_i ——导线上感应过电压最大值，kV，只在极少情况下达到 500～600kV；

I ——雷电流幅值，kA，在设计中一般计入雷击点自然电阻的作用，最大电流采用 $I \leqslant 100$kA；

h_{av} ——导线平均高度，m；

S ——雷击点距线路的距离，m。

由于感应过电压一般很少达到 500～600kV，故对 600kV 及以上线路，感应过电压一般不会引起闪络。

如果线路上挂有地线，由于地线有屏蔽效应，导线上的感应过电压就会降低。挂有地线的导线上的感应过电压 U_{ic} 可按下式计算

$$U_{ic} = U_i \times (1-k) \tag{3-281}$$

式中 U_i ——无地线时导线上的感应过电压，kV；

k ——地线和导线间的耦合系数。

2. 雷击杆塔时导线上的感应过电压

式（3-280）只适用于 $S>65$m 的情况。离线路更近的雷击实际上会被线路吸引而击于线路自身。当雷击杆塔时，由于雷电通道所产生的电磁场的迅速变化，将在导线上感应出与雷电流极性相反的过电压。

GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》推荐感应电压分量可按下列公式计算

$$U_i = \frac{60ah_{c.t}}{k_\beta c} \times \left[\ln\frac{h_t + d_R + k_\beta ct}{(1+k_\beta)(h_t + d_R)}\right] \times \left(1 - \frac{h_{gv}}{h_{av}}k_0\right) \tag{3-282}$$

$$k_\beta = \sqrt{i/(500+i)} \tag{3-283}$$

$$d_R = 5i^{0.65} \tag{3-284}$$

式中 U_i ——反击时的感应电压分量，kV；

h_t ——塔顶高度，m；

i ——雷电流瞬时值，kA；

a ——雷电流陡度，kA/μs；

k_β ——主放电速度与光速 c 的比值；

$h_{c.t}$ ——导线在杆塔处的悬挂高度，m；

h_{av} ——导线对地平均高度，m；

h_{gv} ——地线对地平均高度，m；

d_R ——雷击杆塔时，迎面先导的长度，m；

k_0 ——地线和导线间的耦合系数；

t ——雷电流波头时间，2.6μs。

也可用以下的经验公式计算雷击杆塔时导线上的感应过电压。

当无地线时，对于一般高度的线路，导线上感应过电压的最大值 U_i 可按下式计算

$$U_i = ah_{av} \tag{3-285}$$

式中 h_{av} ——导线的平均高度，m；

a ——感应过电压系数，其值等于以 kA/μs 计的雷电流陡度值。建议取 $a=\frac{I}{2.6}$，I 为雷电流，kA。

当挂有地线时，由于地线的屏蔽作用，则导线上

感应的过电压最大值 U_{ic} 为

$$U_{ic}=ah_{av}\times\left(1-\frac{h_{gv}}{h_{av}}K_0\right) \tag{3-286}$$

式中 K_0——导线与地线间的几何耦合系数。计算方法见本节三、（六）；

h_{av}——地线的平均高度，m。其他符号同式（3-282）及式（3-285）。

（四）雷击杆塔时的过电压及耐雷水平计算

1. 塔顶电位和绝缘承受电压的计算

（1）行波法。

行波法，即将杆塔的各段视为线路段，并视为分布参数，把分布参数的线段化成集中参数模型，然后再用集中参数电路的节点分析方法，求出杆塔各节点电压，得出绝缘子串的电位差随时间的变化过程，并与其伏秒特性进行比较，判断绝缘子串是否闪络。计算过程反映了雷电波在杆塔上的传播过程，以及反射波对杆塔各节点电位的影响。因为这种方法是从传输线的贝杰龙（Bergeron）数学模型出发的，所以又称为贝杰龙法。计算时宜考虑导线上工频电压的影响，以及雷击塔顶时导线上的感应电压。杆塔宜采用分段波阻抗模拟。

采用分段波阻抗模型充分考虑了波在杆塔上的传播过程，并根据杆塔距地面不同高度处的不同波阻抗，将杆塔分成几部分模拟，计算结果比集中电感和单一波阻抗更符合实际。分段波阻抗模型建立的基础是基于垂直导体不同高度处的波阻抗是不同的原理。如图3-168 所示，当波传播到半径 $x_1=ct_1$ 覆盖的区域时 $t=t_1$，该波不能到达其他区域，因此距起点为 x_1 的这段导体的波阻抗 $Z(x_1)$ 可以通过 x_1 区域内的几何和物理参数得出的。由于几何参数 x_1 不同于 $t=t_2$ 时的 x_2，所以 $Z(x_1)$ 不同于 $Z(x_2)$。因此，距起点不同的地方，垂直导体的波阻抗是不同的，可以将垂直导体分割成几段计算波阻抗。

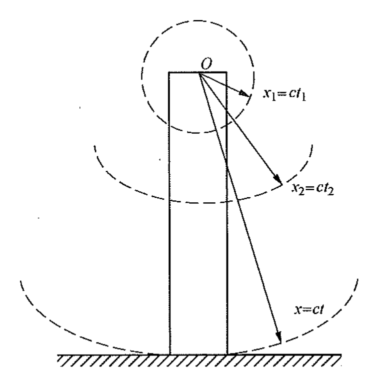


图 3-168 波在垂直导体上的传播

垂直圆柱体的波阻抗值仅依赖于该圆柱体的半径和对地高度，其波阻抗为

$$Z_T=60\times\left(\ln\frac{2\sqrt{2}h}{r}-2\right) \tag{3-287}$$

式中：r 和 h 分别是圆柱体的半径和圆柱体顶端距地垂直高度。

对于 n 根平行圆柱体组成的系统如图 3-170 所示，第 k（$k=2\sim n$）根圆柱体的自波阻抗 Z_{T-kk} 和第 k 根与第 l 根之间的互波阻抗 Z_{T-kl} 可表示为

$$\left.\begin{aligned}Z_{T-kk}&=60\times\left(\ln\frac{2\sqrt{2}h}{r}-2\right)\\ Z_{T-kl}&=60\times\left(\ln\frac{2\sqrt{2}h}{R_{kl}}-2\right)\end{aligned}\right\} \tag{3-288}$$

式中：R_{kl} 是第 k 根和第 l 根导体间的距离。则系统总的波阻抗为

$$Z_{T-n}=\frac{1}{n}(Z_{T-11}+Z_{T-12}+\cdots+Z_{T-1n})=60\times\left(\ln\frac{2\sqrt{2}h}{r_e}-2\right) \tag{3-289}$$

式中：n 为圆柱体的数目，r_e 为多导体系统的等效半径。

对于平行多导体系统如图 3-169 所示，有

$$r_e=\begin{cases}r^{0.5}R^{0.5}\\ r^{1/3}R^{2/3}\\ 2^{1/8}r^{1/4}R^{3/4}\end{cases} \tag{3-290}$$

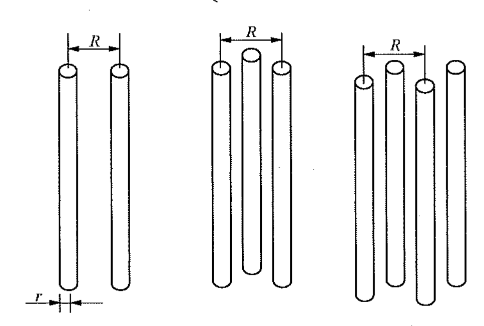


图 3-169 平行多导体系统

对于不平行多导体系统如图 3-170 所示，有

$$\left.\begin{aligned}r&=r_T^{1/3}r_B^{2/3}\\ R&=R_T^{1/3}R_B^{2/3}\end{aligned}\right\} \tag{3-291}$$

式中：r_T、r_B、R_T、R_B 如图 3-171 所示。

杆塔模型如图 3-171 所示的同塔双回线路，每支横担用一条分布参数线段等值，横担波阻抗分别为 Z_{A1}、Z_{A2}、Z_{A3}、Z_{A4}；每段塔身波阻抗也用两端并联的分布参数线段等值，分别为 Z_{T1}、Z_{T2}、Z_{T3}、Z_{T4}（等效支撑塔体的 4 根主干）；Z_{L1}、Z_{L2}、Z_{L3}、Z_{L4}（等效 4 根支柱之间的支架）；R_{ch} 为杆塔的冲击接地电阻，如图 3-172 所示。

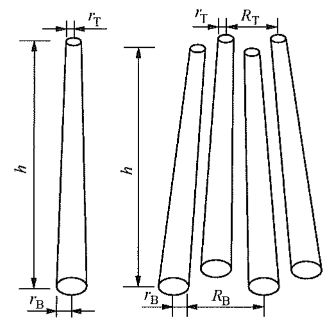


图 3-170 不平行多导体系统

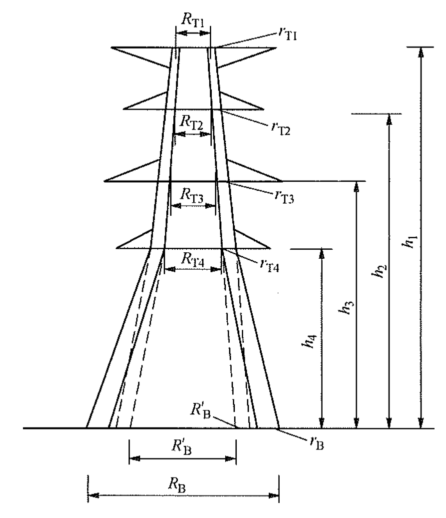


图 3-171 杆塔结构及标注模型

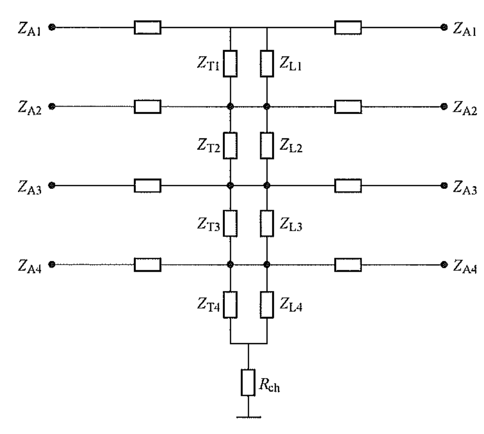


图 3-172 杆塔波阻抗计算模型

横担波阻抗 Z_{Ak} 由下式计算

$$Z_{Ak}=60\ln\frac{2h_k}{r_{Ak}} \qquad (3\text{-}292)$$

式中：h_k（k=1，2，3，4）为横担高度；r_{Ak}（k=1，2，3，4）为横担的等值半径，可取为横担与塔柱连接处半径的 1/2。

主干波阻抗 Z_{Tk} 由下式计算

$$Z_{Tk}=60\times\left(\ln\frac{2\sqrt{2}h_k}{2^{1/8}r_{ek}^{1/4}R_{ek}^{3/4}}-2\right) \quad (k=1、2、3、4) \qquad (3\text{-}293)$$

$$r_{ek}=r_{Tk}^{1/3}r_B'^{2/3} \quad (k=1、2、3) \qquad (3\text{-}294)$$

$$r_{ek}=r_{Tk}^{1/3}r_B^{2/3} \quad (k=4) \qquad (3\text{-}295)$$

$$R_{ek}=R_{Tk}^{1/3}R_B'^{2/3} \quad (k=1、2、3) \qquad (3\text{-}296)$$

$$R_{ek}=R_{Tk}^{1/3}R_B^{2/3} \quad (k=4) \qquad (3\text{-}297)$$

式中：r_{ek} 为单根立柱的等值半径；R_{ek} 为立柱间的等值距离；h_k、r_{Tk}、R_{Tk}、r_B、r_B'、R_B、R_B' 意义如图 3-171 所示。

有支架情况下波阻抗值通常比无支架情况下的波阻抗约小 10%，支架每部分波阻抗为对应主体部分的 9 倍，即

$$Z_{Lk}=9Z_{Tk} \qquad (3\text{-}298)$$

（2）经验公式法。

也可用以下的经验公式计算塔顶电位和绝缘承受电压的计算。

雷击塔顶后，由于避雷线的分流作用，只有一部分雷电流 i_t 流过杆塔电感和接地电阻，可用分流系数表示流经杆塔的雷电流和总雷电流的关系。

$$i_t=\beta i \qquad (3\text{-}299)$$

式中 i_t ——流经杆塔的雷电流瞬时值，kA；

i ——总雷电流瞬时值，kA；

β ——杆塔分流系数。

杆塔分流系数β可近似按图 3-163 所示的等值电路图来进行计算。图中 L_g 为杆塔两侧邻档地线的电感并联值（单位为 μH）。对单地线，L_g 约等于 0.67l（l 为档距长度，m），对双地线，约等于 0.42l。R_{su} 为杆塔冲击接地电阻。L_t 为杆塔电感（单位为 μH），可按表 3-75 选取。

表 3-75 杆塔波阻和电感的平均值

杆塔型式	杆塔波阻抗（Ω）	杆塔电感（μH/m）
无拉线钢筋混凝土单杆	250	0.84
有拉线钢筋混凝土单杆	125	0.42
无拉线钢筋混凝土双杆	125	0.42
铁塔	150	0.50
门型铁塔	125	0.42

如设计中取雷电流波头为斜角波（$i=at$），则按图 3-163 所示，β值可写为

$$\beta=\frac{1}{1+\frac{L_t}{L_g}+\frac{R_{su}}{L_g}t} \tag{3-300}$$

如令 β 为常数，则式（3-300）中的 t 宜取为由 $0-\tau_t$ 的平均值，于是，式（3-300）可变为

$$\beta=\frac{1}{1+\frac{L_t}{L_g}+\frac{R_{su}}{L_g}\times\frac{\tau_t}{2}} \tag{3-301}$$

式中 τ_t——波头长度，μs。

当 $\tau_t=2.6\mu s$ 时，对于一般长度的档距，β 值可按表 3-76 选取。

表 3-76 一般长度档距的线路杆塔分流系数β

线路额定电压（kV）	地线根数	β 值
110	单地线	0.90
	双地线	0.86
220	单地线	0.92
	双地线	0.88
330～500	双地线	0.88

雷电流按斜角波计算时，雷电流陡度取 $a=\frac{di}{dt}=\frac{I}{2.6}$，故塔顶电位的最大值 U_{tp} 为

$$\begin{aligned}U_{tp}&=R_{su}\beta I+L_t\beta\frac{di}{dt}\\&=R_{su}\beta I+L_t\beta\frac{I}{2.6}\\&=\beta I\left(R_{su}+\frac{L_t}{2.6}\right)\end{aligned} \tag{3-302}$$

式中 I——雷电流幅值，kA。

当塔顶电位为 U_{tp} 时，塔顶的地线也具有电位 U_{tp}。由于地线和导线间具有耦合作用，导线将具有耦合电位 kU_{tp}。耦合电位的极性与雷电流相同，此外由于空间电磁场的突然变化，在导线上还会出现感应过电压，感应过电压的极性与雷电流相反。因此，雷击杆塔或避雷线时，导线上电压 U_c 有三个分量

$$U_c=U_R(1-k_0)+U_{tp}k_{co}+U_{line} \tag{3-303}$$

式中 U_R——雷击塔顶时在导线上形成的感应过电压分量，kV；

U_{tp}——雷击点（塔顶、避雷线）的电压，kV；

U_{line}——导线上工作电压，kV；

k_0——避雷线与导线间的几何耦合系数；

k_{co}——避雷线与导线间考虑避雷线上冲击电晕影响后的耦合系数。

当不考虑导线上工作电压，并按式（3-286）表达的雷击塔顶时在导线上形成的感应过电压 U_{ic}，则雷击杆塔或避雷线时，导线上电压 U_c 可表示为

$$U_c=kU_{tp}-U_{ic}=kU_{tp}-ah_{av}\times\left(1-\frac{h_{gv}}{h_{av}}K_0\right) \tag{3-304}$$

线路绝缘上的电压为横担高度处杆塔电位和导线电位之差，故线路绝缘上承受的电压最大值（U_I）为

$$U_I=U_{ta}-U_c \tag{3-305}$$

按式（3-285）表达的雷击杆塔或避雷线时导线上电压 U_c 时

$$\begin{aligned}U_I&=U_{ta}-U_c\\&=\beta I\times\left(R_{su}+\frac{L_t}{2.6}\times\frac{h_a}{h_t}\right)-kU_{tp}+ah_{av}\times\left(1-\frac{h_{gv}}{h_{av}}K_0\right)\end{aligned} \tag{3-306}$$

式中 h_a——横担对地高度，m；

h_t——杆塔高度，m。

2. 雷击塔顶时耐雷水平的计算

雷击线路时线路绝缘不发生闪络的最大雷电流幅值叫耐雷水平。

（1）相交法。

可采用相交法判断绝缘子的闪络，即比较绝缘子串上的电压和标准波下的伏秒特性 $U(t)$。如图 3-173 所示，当绝缘子串上的过电压波与伏秒特性曲线相交即判断为闪络，当绝缘子串上的过电压波与伏秒特性曲线不相交即不闪络。

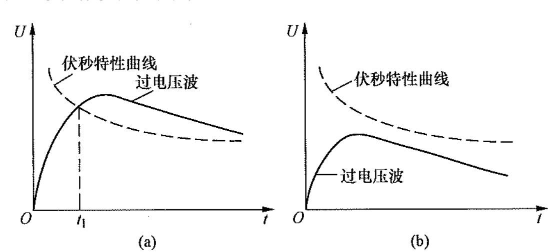


图 3-173 相交法判断绝缘子串闪络
（a）与伏秒特性曲线相交；（b）与伏秒特性曲线不相交

（2）经验公式法。

也可用经验公式判断绝缘子的闪络，即当 U_I 大于等于塔头绝缘（绝缘子串或塔头间隙）的 50%冲击放电电压 $U_{50\%}$ 时判断为闪络。若令式（3-306）的 U_I 等于 $U_{50\%}$，则可得雷击塔顶时的耐雷水平 I_1 为

$$I_1=\frac{U_{50\%}}{(1-k)\times\beta R_{su}-\left(\frac{h_a}{h_t}-k\right)\times\beta\times\frac{L_t}{2.6}+\left(1-\frac{h_{gv}}{h_{av}}K_0\right)\times\frac{h_{av}}{2.6}} \tag{3-307}$$

式中 k——避雷线与导线间的耦合系数；

K_0——避雷线与导线间的几何耦合系数；

$U_{50\%}$——应取正极性冲击放电电压。

以上是杆塔上装有地线的情况。当线路未装地线时，其雷击杆塔时耐雷水平的计算可按以下原则考虑。

对于中性点不直接接地系统，由于雷击无地线的塔顶造成对一相导线反击放电时不会引起线路跳闸，必须再有第二相导线反击放电，才会引起线路跳闸造成故障。因此，导致第二相导线闪络放电的雷电流才是所需的耐雷水平。此时，由于第一相导线已对地（对杆塔）放电，使其具有了塔顶电位。这对第二相导线来讲，就相当于有了一根地线，只是雷电流没有分流而已，因此，其耐雷水平可按式（3-307）并令 $\beta=1$ 来计算，即

$$I_1=\frac{U_{50\%}}{(1-k)R_{su}-\left(\frac{h_a}{h_t}-k\right)\times\frac{L_t}{2.6}+\left(1-\frac{h_{gv}}{h_{av}}K_0\right)\times\frac{h_{av}}{2.6}} \tag{3-308}$$

对中性点直接接地系统，当雷击无地线的杆塔时，只要一相导线绝缘发生放电即导致线路跳闸。因此，雷击塔顶时的耐雷水平可按式（3-308）并令 $k=0$、$K_0=0$ 来计算，即

$$I_1=\frac{U_{50\%}}{R_{su}-\frac{h_a}{h_t}\times\frac{L_t}{2.6}+\frac{h_{av}}{2.6}} \tag{3-309}$$

（3）线路的反击耐雷水平。

GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》规定，有地线线路的反击耐雷水平不宜低于表 3-77 所列数值。

表 3-77　有地线线路的反击耐雷水平　kA

系统标称电压（kV）	35	66	110	220	330	500	750	1000
单回线路	24～36	31～47	56～68	87～96	120～151	158～177	208～232	200
同塔双回线路	—	—	50～61	79～92	108～137	142～162	192～224	200

注 1. 反击耐雷水平的较高和较低值分别对应线路杆塔冲击接地电阻 7Ω 和 15Ω。
2. 雷击时刻工作电压为峰值且与雷击电流反极性。
3. 发电厂、变电站进线保护段杆塔耐雷水平不宜低于表中的较高数值。
4. 1000kV 系统为 GB 50665—2011《1000kV 架空输电线路设计规范》推荐值。

（五）雷击档距中央地线或雷击导线时的过电压及耐雷水平计算

（1）雷击档距中央地线时，只要地线与导线间的空气间隙距离满足第八节七、档距中央的绝缘配合所述绝缘配合的要求，则一般不会发生档中闪络，所以可不再计算这种情况。

（2）雷直击导线，或雷绕过地线击于导线时，导线上的电位为

$$U=\frac{I}{2}\times\frac{z}{2}=\frac{Iz}{4} \tag{3-310}$$

若令式（3-310）中的 U 等于绝缘子串（或塔头空气间隙）的 50%放电电压（$U_{50\%}$），则可求得雷击导线时的耐雷水平（I_2）为

$$I_2=\frac{4U_{50\%}}{z}\approx\frac{U_{50\%}}{100} \tag{3-311}$$

式中导线波阻抗 $z\approx400\Omega$。$U_{50\%}$ 取绝缘子串或空气间隙的雷电冲击负极性闪络电压。

（六）线路雷击跳闸率的计算

（1）建弧率。绝缘子串和空气间隙在雷电冲击闪络之后，转变为稳定的工频电弧的概率（即建弧率）与沿绝缘子串和空气间隙的平均运行电压梯度有关，也和去游离条件有关。根据实验和运行经验，GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》推荐建弧率 η 按下式计算

$$\eta=(4.5E^{0.75}-14)\times10^{-2} \tag{3-312}$$

式中　E——绝缘子串的平均运行电压梯度有效值，kV/m。

平均运行电压梯度 E，对中性点直接接地系统有

$$E=\frac{U_n}{\sqrt{3}l_i} \tag{3-313}$$

对于中性点绝缘、消弧线圈接地系统有

$$E=\frac{U_n}{2l_i+2l_m} \tag{3-314}$$

式中　U_n——额定电压，kV；

l_i——绝缘子串的闪络距离，m；

l_m——木横担线路的线间距离，m。对铁横担和钢筋混凝土横担，$l_m=0$。

（2）中性点不直接接地系统，一般高度的铁塔或钢筋混凝土杆，无避雷线线路的雷击跳闸率可按下式计算：

$$n=N\eta P \tag{3-315}$$

式中　n——雷击跳闸率，次/（100km·年）；

N——每年每 100km 线路的雷击次数，可按式（3-270）计算；

η——建弧率，按式（3-312）计算；

P——超过耐雷水平 I_1 的雷电流概率，按式（3-262）或式（3-263）计算。

（3）在中性点直接接地系统中，一般高度的铁塔或钢筋混凝土杆，无避雷线线路的雷击跳闸率可按下

式计算：

$$n = N\eta \times [gP_1 + (1-g)P_2] \quad (3\text{-}316)$$

式中 g——线路的击杆率；

P_1——超过雷击杆塔时耐雷水平 I_1 的雷电流概率；

P_2——超过雷击导线时耐雷水平 I_2 的雷电流概率；

N、η 的含义同式（3-315）。

（4）一般高度的有地线线路的雷击跳闸率可按下式计算：

$$n = N\eta \times [gP_1 + P_\theta P_2 + (1-g)P_3] \quad (3\text{-}317)$$

式中 P_θ——绕击率；

P_3——雷击档距中央的避雷线时，雷电流超过耐雷水平的概率。由于发生这种闪络的情况极少，其值一般可不予计算，即令 $P_3 = 0$；

式中：其他符号含义同式（3-315）、式（3-316）。

当考虑导线工作电压瞬时值时，式（3-316）可表示为

$$n = N\eta \times (gP_1 + P_{sf}) \quad (3\text{-}318)$$

式中 P_1——超过雷击杆塔顶部时耐雷水平 I_1 的雷电流概率，I_1 随雷击时刻系统工作电压瞬时值不同而变化；

P_{sf}——线路的绕击闪络概率，应按区间组合统计法计算雷击时刻运行电压瞬时值。

（七）导线和地线（或耦合线）间耦合系数 k 的计算

耦合系数 k 可按下式计算

$$k = k_1 k_0 \quad (3\text{-}319)$$

式中 k_0——导线和地线（或耦合线）间几何耦合系数；

k_1——电晕校正系数。

1. 几何耦合系数 k_0 的计算

几何耦合系数 k_0 可由无损耗平行多导线系统波的传播方程求得。假定线路是无损耗的，导线中波的运动可以近似看成是平面电磁波的传播。这样，只需引入波速的概念就可以将麦克斯韦静电方程运用到波过程的计算中。如图 3-174 所示。设有与地面平行的几根平行导线系统，则 n 根导线中导线 k 的电位可由麦克斯韦静电方程表示为

$$U_k = a_{k1}Q_1 + a_{k2}Q_2 + \cdots + a_{kk}Q_k + \cdots + a_{kn}Q_n \quad (3\text{-}320)$$

式中 Q_1，Q_2，…，Q_k，…，Q_n——导线 1，2，…，k，…，n 单位长度上的电荷；

a_{kk}——导线 k 单位长度的自电位系数；

a_{kn}——单位长度导线 k 与导线 n 间的互电位系数。

a_{kk} 与 a_{kn} 可用镜像法算出

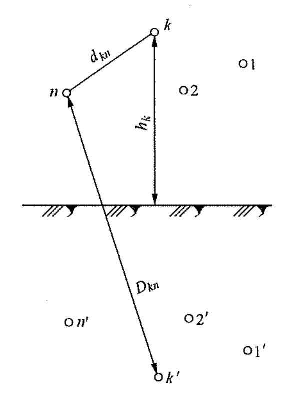


图 3-174 n 根平行多导线系统

$$a_{kk} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r} \times \ln\frac{2h_k}{r_k} \quad (3\text{-}321)$$

$$a_{kn} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r} \times \ln\frac{D_{kn}}{d_{kn}} \quad (3\text{-}322)$$

式中 r_k——导线 k 的半径；

h_k——导线 k 的平均高度；

d_{kn}——导线 k 与导线 n 间的距离；

D_{kn}——导线 n 与导线 k 的镜像 k' 间的距离；

ε_0——空气的介电系数；

ε_r——导线所在介质的相对介电系数，对于空气可取 $\varepsilon_r = 1$。

在式（3-320）右侧乘以 $\frac{v}{v}$（v 为波速），并以 $i = Qv$ 代入，则可得

$$U_k = z_{k1}i_1 + z_{k2}i_2 + \cdots + z_{kk}i_k + \cdots + z_{kn}i_n \quad (3\text{-}323)$$

式中 z_{kk}——导线 k 的自波阻抗；

z_{kn}——导线 k 与导线 n 间的互波阻抗。

z_{kk} 与 z_{kn} 可按下式计算

$$z_{kk} = \frac{a_{kk}}{v} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}\ln\frac{2h_k}{r_k} = 60\ln\frac{2h_k}{r_k} \quad (3\text{-}324)$$

$$z_{kn} = \frac{a_{kn}}{v} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}\ln\frac{D_{kn}}{d_{kn}} = 60\ln\frac{D_{kn}}{d_{kn}} \quad (3\text{-}325)$$

式中符号含义同式（3-320）及式（3-321）。

设有一根地线(1)及一根导线(2)，则按式(3-323)可列出

$$\left.\begin{aligned} u_1 &= z_{11}i_1+z_{12}i_2 \\ u_2 &= z_{21}i_1+z_{22}i_2 \end{aligned}\right\} \tag{3-326}$$

由于导线（2）是对地绝缘的，故 $i_2=0$，于是可得导线与地线间的几何耦合系数（2）为

$$k_0=\frac{u_2}{u_1}=\frac{z_{21}}{z_{11}}=\frac{\ln\dfrac{D_{12}}{d_{12}}}{\ln\dfrac{2h_1}{r_1}} \tag{3-327}$$

式中 r_1——地线的半径；

h_1——地线的平均高度；

d_{12}——地线与导线间的距离；

D_{12}——地线与导线镜像间的距离。

设有两根地线（1 及 2）和一根导线（3），则按式（3-323）可列出

$$\begin{aligned} u_1 &= z_{11}i_1+z_{12}i_2+z_{13}i_3 \\ u_2 &= z_{21}i_1+z_{22}i_2+z_{23}i_3 \\ u_3 &= z_{11}i_1+z_{12}i_2+z_{13}i_3 \end{aligned} \tag{3-328}$$

令导线上的电流 $i_3=0$，若认为两根地线电位相同，即 $u_1=u_2=u$，解上述联立方程（未知数为 u_3、i_1、i_2），则得

$$U_3=\frac{\Delta_1}{\Delta} \tag{3-329}$$

式中

$$\Delta_1=\begin{vmatrix} U & z_{11} & z_{12} \\ U & z_{21} & z_{22} \\ 0 & z_{31} & z_{32} \end{vmatrix}=U\begin{vmatrix} 1 & z_{11} & z_{12} \\ 1 & z_{21} & z_{22} \\ 0 & z_{31} & z_{32} \end{vmatrix} \tag{3-330}$$

$$\Delta=\begin{vmatrix} 0 & z_{11} & z_{12} \\ 0 & z_{21} & z_{22} \\ -1 & z_{31} & z_{32} \end{vmatrix}=(-1)\times(-1)^{3+1}\begin{vmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{vmatrix} \tag{3-331}$$

故两根地线与一根导线的几何耦合系数为

$$K_{0(1、2\text{-}3)}=\frac{U_3}{U}=\frac{\dfrac{\Delta_1}{\Delta}}{U}=-\frac{\begin{vmatrix} 1 & z_{11} & z_{12} \\ 1 & z_{21} & z_{22} \\ 0 & z_{31} & z_{32} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{vmatrix}}=\frac{z_{13}\times(z_{22}-z_{12})+z_{23}\times(z_{11}-z_{12})}{z_{11}z_{12}-z_{12}^2} \tag{3-332}$$

如果两地线悬挂高度及直径均相等，则 $z_{11}=z_{22}$，此时

$$K_{0(1、2\text{-}3)}=\frac{z_{13}+z_{23}}{z_{11}+z_{12}}=\frac{\dfrac{z_{13}}{z_{11}}+\dfrac{z_{23}}{z_{11}}}{1+\dfrac{z_{12}}{z_{11}}}=\frac{k_{0(1\text{-}3)}+k_{0(2\text{-}3)}}{1+k_{0(1\text{-}2)}} \tag{3-333}$$

设有两根地线（1 及 2）、一根耦合地线（3）及一根导线（4），则可按式（3-333）列出 4 个方程式。令 $u_1=u_2=u_3=u$ 及 $i_4=0$ 代入方程组，则得两根地线及一根耦合线共同对导线（4）的几何耦合系数为

$$K_{0(1、2、3\text{-}4)}=(-1)^4\frac{\begin{vmatrix} 1 & z_{11} & z_{12} & z_{13} \\ 1 & z_{21} & z_{22} & z_{23} \\ 1 & z_{31} & z_{32} & z_{33} \\ 0 & z_{41} & z_{42} & z_{43} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} \\ z_{31} & z_{32} & z_{33} \end{vmatrix}} \tag{3-334}$$

推而广之，设有 1、2、…、$(n-1)$ 个地线和耦合线，则对导线 n 的几何耦合系数可按下式计算

$$K_{0(1、2、3\cdots、n-1\text{-}n)}=(-1)^n\frac{\begin{vmatrix} 1 & z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1(n-1)} \\ 1 & z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2(n-1)} \\ & & \cdots & & \\ 0 & z_{n1} & z_{n2} & \cdots & z_{n(n-1)} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1(n-1)} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2(n-1)} \\ & \cdots & & \\ z_{(n-1)1} & z_{(n-1)2} & & z_{(n-1)(n-1)} \end{vmatrix}} \tag{3-335}$$

为便于参考，刘继在《电气装置的过电压保护》中列出了几种典型线路的几何耦合系数见表 3-78。

表 3-78　几种典型线路的几何耦合系数 k_0 的计算值

额定电压（kV）	线路型式	几何耦合系数 k_0
35	无地线，消弧线圈接地或不接地	$k_{0(1\text{-}2)}=0.238$
110	单地线	$k_{0(1\text{-}2)}=0.114$
	单地线、单耦合线	$k_{0(1,2\text{-}3)}=0.275$
	双地线、双耦合线	$k_{0(1,2,3,4\text{-}5)}=0.438$
220	单地线	$k_{0(1\text{-}2)}=0.103$
	双地线	$k_{0(1,2\text{-}3)}=0.237$
500	双地线	$k_{0(1,2\text{-}3)}=0.20$
	双地线、双回路塔	$k_{0(1,2\text{-}3)}=0.124$

2. 电晕校正系数 k_1 的计算

当雷击时，由于地线上的冲击电压超过地线的起始电晕电压，地线上将出现电晕。由于电晕的存在，使地线径向尺寸增大。其结果将使地线与导线间的耦合系数增大。故几何耦合系数 k_0 尚应乘以电晕校正系数 k_1，以考虑电晕的影响。

试验表明，负冲击电晕时的耦合系数比正冲击电晕时小。

雷直击塔顶时，电晕校正系数 k_1 可按表 3-79 选取。表中也一并列出《电气装置的过电压保护》所列有耦合线时的数据。雷击地线档距中央时，电晕校正系数 k_1 可取为 1.5。

表 3-79 雷击塔顶时的电晕校正系数 k_1

额定电压（kV）	20～35	60～110	220～330	500～750
双地线	1.1	1.2	1.25	1.28
单地线	1.15	1.25	1.3	—
双地线有耦合线	1.1	1.15	1.2	1.25
单地线有耦合线	1.1	1.2	1.25	—

注 有耦合线的单、双地线数据取自《电气装置的过电压保护》。

（八）500kV 及以下同塔双回路防雷特性

1. 线路排列方式对反击跳闸率的影响

以 500kV 为例，在雷击瞬间，两相导线电压的瞬时电位差最大可达 777kV，这一电压叠加到雷电冲击电位上，将导致同一横担不同相序的两回导线电位差异很大，因而同一横担上不同相序的两回导线击穿概率有很大差别。因此对于 500kV 同杆双回线路，导线采用逆相序排列方式，将不同相序的导线安排在同一层横担上，能有效地减少同杆双回线路同时雷击闪络的发生。

2. 绝缘方式对反击跳闸率的影响

不平衡绝缘的原则是利用不同类型绝缘子（串）的雷电闪络特性差异使二回路绝缘水平低的回路先闪络，闪络后的导线相当于地线，增加了对另一回路的耦合作用，提高了另一回路的耐雷水平，使之不发生闪络，以保证另一回路可持续供电。

为了减少双回同时跳闸率，日本一度采用不平衡绝缘，想利用弱绝缘回路导线先闪络后，加强了另一回路的屏蔽作用，从而达到降低双回同时跳闸的目的。但运行结果是总的跳闸率增加太多，如图 3-175 所示，降低双回跳闸率的效果不明显，目前日本 500kV 线路基本上均采用平衡高绝缘。日本的运行经验与他们那时把其中 1 回路绝缘水平降低得过低有关，见表 3-80，降低最少的另 1 回路绝缘水平的 80%，有的降到 72%，甚至降到 61.5%。不可笼统地得出根据日本的运行经验不能采用不平衡绝缘的结论，日本 500kV 不平衡线路低绝缘回路的绝缘水平只有高绝缘回路的 61%、标准绝缘水平的 75%，而其高绝缘水平只与我们的 23 片 XP－300 型正常绝缘相当。因此，日本的同杆双回线路采用不平衡绝缘后，总跳闸率过高是可以理解的。

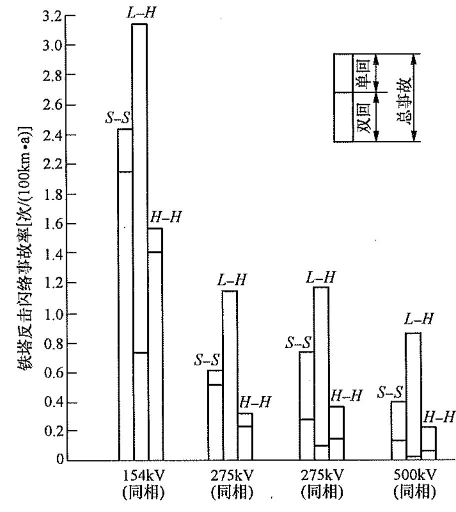


图 3-175 日本东京电力公司同塔双回线路雷击跳闸率统计（根据浙江省电力局 1996 年 7 月赴国外对超高压多回同塔线路考察的资料整理） S—标准角间隙；L—低绝缘角间隙；H—高绝缘角间隙

表 3-80 日本不同电压等级各种角间隙数值

电压（kV）	154			275			500		
角间隙种类	S	L	H	S	L	H	S	L	H
角间隙（mm）	1130	950	1350	2000	1600	2600	3200	2400	3950

四、输电线路综合防雷措施

在确定输电线的防雷方式时，应全面考虑线路的重要程度、系统运行方式、线路经过地区雷电活动的强弱、地形地貌特征、土壤电阻率的高低等条件，并应结合当地已有线路的运行经验，进行全面的技术经济比较，从而确定出合理的保护措施。

输电线的防雷保护措施一般有如下各项。

（一）架设地线

地线是输电线路最基本的防雷措施之一。由前述各节可以看出，地线在防雷方面具有以下功能：①防止雷直击导线；②雷击塔顶时对雷电流有分流作用，

减少流入杆塔的雷电流，使塔顶电位降低；③对导线有耦合作用，降低雷击杆塔时塔头绝缘（绝缘子串和空气间隙）上的电压；④对导线有屏蔽作用，降低导线上的感应过电压。

GB 50545—2010、GB/T 50064—2014、GB 50665—2011 对各级电压线路架设地线的要求有如下规定。

（1）500kV 及以上电压等级的线路应沿全线架设双地线。

（2）220～330kV 线路应沿全线架设地线。在山区，宜架设双地线；在少雷区，宜架设单地线。

（3）110kV 线路宜沿全线架设地线。在山区和雷电活动特殊强烈地区，宜架设双地线。在少雷区或运行经验证明雷电活动轻微地区，可不沿全线架设地线，但应在变电站或发电厂的进线段架设 1～2km 地线，且应装设自动重合闸装置。

（4）60kV 线路，负荷重要且所经地区年平均雷暴日数为 30 以上地区，宜沿全线架设地线。对不沿全线架设地线的 60kV 线路，亦应在变电站或发电厂的进线段架设 1～2km 的地线。

（5）35kV 及以下线路，一般不沿全线架设地线，但应在变电站或发电厂的进线段架设 1～2km 地线。

（6）装设地线的线路，对于单回路，330kV 及以下线路的保护角不宜大于 15°，500～750kV 线路的保护角不宜大于 10°，1000kV 线路的保护角在平原丘陵地区不宜大于 6°，在山区不宜大于 −4°；对于同塔双回或多回路，110kV 线路的保护角不宜大于 10°，220～750kV 线路的保护角不宜大于 0°，1000kV 线路的保护角在平原丘陵地区不宜大于 −3°，在山区不宜大于 −5°；单地线线路保护角不宜大于 25°；对重覆冰线路的保护角可适当加大；对于多雷区和强雷区的线路可采用负保护角。杆塔上两根地线间的距离，不应超过导线与地线间垂直距离的 5 倍。

（7）装有地线的线路，在一般土壤电阻率地区，其反击耐雷水平不宜低于表 3-77 所列数值。

（8）1000kV 线路变电站 2km 进出线段的保护角不宜大于 −4°。1000kV 线路耐张塔地线对跳线保护角，平原单回路不宜大于 6°，山区单回路和双回路不宜大于 0°。

（二）降低杆塔接地电阻

对一般高度的杆塔，降低接地电阻是提高线路耐雷水平防止反击的有效措施。现行规程对杆塔接地电阻的要求见本节五、接地设计（一）有关规定及表 3-82。

降低杆塔接地电阻，一般可采用增设接地装置（带、管），采用引外接地装置或连续伸长接地线（在过峡谷时可跨谷而过，起耦合作用等）。

连续伸长接地线是沿线路在地中埋设 1～2 根接地线，并可与下一基塔的杆塔接地装置相连。此时对工频接地电阻值不做要求。国内外的运行经验证明，它是降低高土壤电阻率地区杆塔接地电阻的有效措施之一。

除上述措施外，对特殊地段亦可采用化学降阻剂降低杆塔接地电阻。

（三）架设耦合地线

为了提高线路的防雷性能，减少线路的雷击跳闸率，可采用在导线下面（或其附近）加挂耦合线（即架空地线）的办法。加挂耦合线虽不能减少绕击率，但能在雷击杆塔时起分流作用和耦合作用，降低杆塔绝缘上所承受的电压，提高线路的耐雷水平。

耦合线的耦合系数计算可参照本节前述内容进行。如图 3-176 所示，有耦合线时的杆塔分流系数可按下列公式计算。

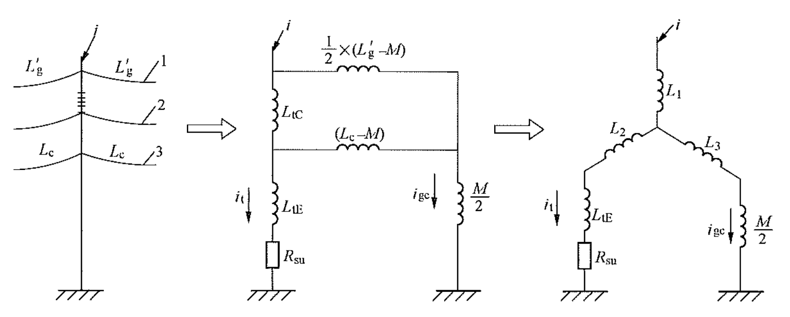


图 3-176　有耦合线时的等值电路图

1—地线；2—导线；3—耦合线

$$\beta_c = \frac{L_3 + \frac{M}{2}}{L_2 + L_3 + L_{te} + \frac{M}{2} + R_{su} \times \frac{\tau}{2}} \tag{3-336}$$

$$L_2 = \frac{L_{tc} \times (Lc - M)}{2L_{tc} + L_c + L'_g - 2M} \tag{3-337}$$

$$L_3 = \frac{\frac{1}{2}\times(L'_g - M)\times(L_c - M)}{2L_{tc} + L_c + L'_g - 2M} \quad (3\text{-}338)$$

式中　β_c——有耦合线时的杆塔分流系数；

M——一档耦合线与地线间的互感，μH；

L_{tc}——地线至耦合线一段塔身电感，μH；

L_{te}——耦合线至地面一段塔身电感，μH；

R_{su}——杆塔冲击接地电阻，Ω；

L_c、L'_g——一档耦合线及地线自感，μH；

τ——雷电流波头长度，μs。

当无耦合线时，令 $L_c\to\infty$，M=0，则式（3-336）中的 β_c 变为式（3-301）。

（四）安装线路避雷器或安装绝缘子并联间隙

线路避雷器悬挂在线路杆塔上与线路绝缘子相并联，一般用来限制输电线路上因雷击（直击或绕击）导致的过电压，防止输电线路上与其并联安装的线路绝缘子串闪络而导致的短路等各种故障。由于其费用较高，一般用于多雷区、强雷区或地闪密度较高的区段，并应符合下列要求：

（1）安装线路避雷器宜根据技术经济原则因地制宜地制定实施方案。

（2）线路避雷器宜在下列地点安装：多雷地区发电厂、变电站进线段且接地电阻较大的杆塔；山区线路易击段杆塔和易击杆；山区线路杆塔接地电阻过大、易发生闪络切改善接地电阻困难也不经济的杆塔；大跨越的高杆塔；多雷区同塔双回路线路易击段的杆塔。

（3）线路避雷器在杆塔上的安装方式应符合下列要求：

1）110、220kV 单回线路宜在 3 相绝缘子串旁安装；

2）330～750kV 单回线路可在两边相绝缘子串旁安装；

3）同塔双回线路宜在一回线路绝缘子串旁安装。

采用间隙装置与绝缘子串并联，接闪雷电，疏导工频电弧，虽有雷击闪络，但无永久性故障，从而有效地防止绝缘子损坏，重合闸能够成功动作。中雷区及以上地区或地闪密度较高的地区，可采取安装绝缘子并联间隙的措施保护绝缘子，并应符合下列要求：

（1）绝缘子并联间隙与被保护的绝缘子的雷电放电电压之间的配合应做到雷电过电压作用时并联间隙可靠动作，同时不宜过分降低线路绕击或反击耐雷水平。

（2）绝缘子并联间隙应在冲击放电后有效地引导工频短路电流电弧离开绝缘子本体，以免其灼伤。

（3）绝缘子并联间隙的安装应牢固，并联间隙本体应有一定的耐电弧和防腐蚀能力。

（五）其他具体措施

1. 装设自动重合闸

据统计，我国 110kV 及以上输电线路的自动重合闸重合成功率可达 75%～95%，35kV 及以下线路约为 50%～80%。因此，GB/T 50064—2014 要求，各级电压线路应尽量装设三相或单相自动重合闸。

2. 加强绝缘

增加绝缘子片数（塔头间隙也相应增大），可提高一些耐雷水平，但这样做不仅增加了绝缘费用，也增大了塔头尺寸，因此，一般不采用这种办法。只是在高海拔地区和雷电活动强烈地段，可以考虑适当加强绝缘。另外，GB 50545—2010 规定，全高超过 40m 有地线杆塔，每增高 10m 应增加一片绝缘子。

当前在线路防雷措施上，一些线路尚分别安装有可控放电避雷针、放绕击避雷针、旁路屏蔽地线等。各工程可根据实际运行经验有针对性的进行选用。

（六）重点地段的保护措施

1. 对发电厂及变电站进线段的保护

（1）GB/T 50064—2014 对发电厂及变电站进线段的保护做了如下规定：

未沿全线架设地线的 35～110kV 架空输电线路，应在变电站 1～2km 的进线段架设地线，并应采用图 3-177 所示的保护接线。在雷季，变电站 35～110kV 进线的隔离开关或断路器经常断路运行，同时线路侧又带电时，必须在靠近隔离开关或断路器处装设一组金属氧化物避雷器（MOA）。220kV 架空输电线路 2km 进线保护段范围内以及 35～110kV 线路 1～2km 进线保护段范围内的杆塔耐雷水平，应符合表 3-77 的要求。

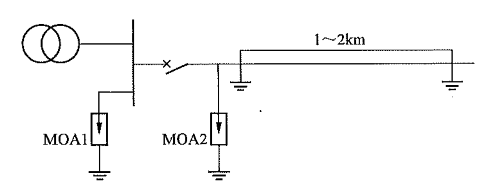


图 3-177　35～110kV 变电站的进线保护接线

（2）GB/T 50064—2014 规定对发电厂（不含水力发电厂）和变电站的接地网，应与 110kV 及以上架空线路的地线直接相连，并应有便于分开的连接点。6～66kV 架空线路的地线不得直接和发电厂和变电站配电装置架构相连。发电厂和变电站接地网应在地下与架空线路地线的接地装置相连接，连接线埋在地中的长度不应小于 15m。

从线路终端杆塔到配电装置的一档线路的保护，可采用独立避雷针，也可在线路终端塔上装设避雷针。

2. 对线路交叉跨越档的保护

GB/T 50064—2014 对线路交叉跨越档的保护做了如下规定。

（1）当导线运行温度为 40℃或当设计允许温度 80℃的导线运行温度为 50℃时，同级电压线路相互交叉或与较低电压线路、通信线路交叉时的两交叉线路导线间或上方线路导线与下方线路地线间的垂直距离，不得小于表 3-81 所列数值。对按允许载流量计算导线截面的线路，还应校验当导线为最高允许温度时的交叉距离，此距离应大于操作过电压要求的空气间隙距离，且不得小于 0.8m。

表 3-81　同级电压线路相互交叉或与较低电压线路、通信线路交叉时的两交叉线路导线间或上方线路导线与下方线路地线间的垂直距离

系统标称电压（kV）	6、10	20～110	220	330	500	750	1000
交叉距离（m）	2	3	4	5	6（8.5）	7（12）	10（16）18*

注　括号内为至输电线路杆顶或至通信线路之交叉距离。

*　1000kV 单回路至通信线路之交叉距离。

（2）6kV 及以上的同级电压线路相互交叉或与较低电压线路、通信线路交叉时，交叉档应采取下列保护措施。①交叉档两端的钢筋混凝土杆或铁塔，不论有无地线，均应接地。②交叉距离比表 3-81 所列数值大 2m 及以上时，交叉档可不采取保护措施。

（3）交叉点至最近杆塔的距离不超过 40m，可不在此线路交叉档的另一杆塔上装设交叉保护用的接地装置。

五、接地设计

(一) 有关规定

输电线路的杆塔接地装置主要是为了导泄雷电流入地，以保持线路有一定的耐雷水平。

GB 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定，输电线路杆塔接地装置应按以下要求进行设计。

（1）装有地线的架空线路杆塔的工频接地电阻，不宜超过表 3-82 的规定；除沥青地面的居民区外，其他居民区内，不接地、谐振接地、谐振—低电阻接地和高电阻接地系统中无地线架空线路的金属杆塔和钢筋混凝土杆塔应接地。

（2）6kV 及以上无地线线路钢筋混凝土杆宜接地，金属杆塔应接地，接地电阻不宜超过 30Ω。

（3）除多雷区外，沥青路面上的架空线路的钢筋混凝土杆塔和金属杆塔，以及有运行经验的地区，可不另设人工接地装置。

（4）66kV 及以上钢筋混凝土杆铁横担和钢筋混凝土横担线路的地线支架、导线横担与绝缘子固定部分或瓷横担固定部分之间，宜有可靠的电气连接，并应与接地引下线相连。主杆非预应力钢筋上下已用绑扎或焊接连成电气通路时，可兼作接地引下线。利用钢筋兼作接地引下线的钢筋混凝土电杆时，其钢筋与接地螺母、铁横担间应有可靠的电气连接。

表 3-82　有地线的线路杆塔的工频接地电阻

土壤电阻率ρ（Ω·m）	$\rho\leqslant 100$	$100<\rho\leqslant 500$	$500<\rho\leqslant 1000$	$1000<\rho\leqslant 2000$	$\rho>2000$
接地电阻（Ω）	10	15	20	25	30

（5）高压架空线路杆塔的接地装置，可采用下列型式：

1）在土壤电阻率$\rho\leqslant 100\Omega\cdot m$的潮湿地区，可利用铁塔和钢筋混凝土杆自然接地。发电厂和变电站的进线段，应另设雷电保护接地装置。在居民区，当自然接地电阻符合要求时，可不设人工接地装置。

2）在土壤电阻率 $100\Omega\cdot m<\rho\leqslant 300\Omega\cdot m$ 的地区，除应利用铁塔和钢筋混凝土杆的自然接地外，并应增设人工接地装置，接地极埋设深度不宜小于 0.6m。

3）在土壤电阻率 $300\Omega\cdot m<\rho\leqslant 2000\Omega\cdot m$ 的地区，可采用水平敷设的接地装置，接地极埋设深度不宜小于 0.5m。

4）在土壤电阻率$\rho>2000\Omega\cdot m$ 的地区，接地电阻很难降到 30Ω 以下时，可采用 6～8 根总长度不超过 500m 的放射形接地极或采用连续伸长接地极。放射形接地极可采用长短结合的方式。接地极埋设深度不宜小于 0.3m。接地电阻可不受限制。

5）居民区和水田中的接地装置，宜围绕杆塔基础敷设成闭合环形。对工作于有效接地系统的城镇居民区的杆塔，如有接地时短路电流过大的情况，应校验杆塔周围人员有无危险电击的可能，并采取相应的措施。

6）放射形接地极每根的最大长度应符合表 3-83 的规定。

表 3-83　放射形接地极每根的最大长度

土壤电阻率ρ（Ω·m）	$\rho\leqslant 500$	$500<\rho\leqslant 1000$	$1000<\rho\leqslant 2000$	$2000<\rho\leqslant 5000$
最大长度（m）	40	60	80	100

7）在高土壤电阻率地区应采用放射形接地装置，

且在杆塔基础的放射形接地极每根长度的 1.5 倍范围内有土壤电阻率较低的地带时，可部分采用引外接地或其他措施。

（6）如接地装置由很多水平接地体或垂直接地体组成，为减少相邻接地体的屏蔽作用，垂直接地体的间距不应小于其长度的 2 倍；水平接地体的间距可根据具体情况确定，但不宜小于 5m。

（7）接地体的截面积及断面形状对接地电阻影响不大，因此，接地体材料规格的选择主要考虑腐蚀及机械强度的需要。

人工接地极，水平敷设时可采用圆钢、扁钢；垂直敷设时可采用角钢或钢管。腐蚀较重地区采用铜或铜覆钢材时，水平敷设的人工接地极可采用圆铜、扁铜、铜绞线、铜覆钢绞线、铜覆圆钢或铜覆扁钢；垂直敷设的人工接地极可采用圆铜或铜覆圆钢等。

接地网采用钢材时，按机械强度要求的钢接地材料的最小尺寸，应符合表 3-84 的要求。目前在实际线路工程中，对非腐蚀性地区，一般采用ϕ12 镀锌圆钢作接地体，接地引下线也采用ϕ12 镀锌圆钢。敷设在腐蚀性较强场所的接地装置，应根据腐蚀的性质采取热镀锡、热镀锌等防腐措施，或适当加大截面。

接地网采用铜或铜覆钢材时，按机械强度要求的铜或铜覆钢材料的最小尺寸，应符合表 3-85 的要求。

表 3-84　钢接地材料的最小尺寸

种类	规格及单位	地上	地下
圆钢	直径（mm）	8	8/10
扁钢	截面积（mm²）	48	48
	厚度（mm）	4	4
角钢	厚度（mm）	2.5	4
钢管	管壁厚（mm）	2.5	3.5/2.5

注 1. 地下部分圆钢的直径，其分子、分母数据分别对应于架空线路和发电厂、变电站的接地网。
2. 地下部分钢管的壁厚，其分子、分母数据分别对应于埋于土壤和埋于室内混凝土地坪中。
3. 架空线路杆塔的接地极引出线，其截面积不应小于 50mm²，并应热镀锌。

表 3-85　铜或铜覆钢接地材料的最小尺寸

种类	规格及单位	地上	地下
铜棒	直径（mm）	8	水平接地极为 8
			垂直接地极为 15
扁铜	截面积（mm²）	50	50
	厚度（mm）	2	2
铜绞线	截面积（mm²）	50	50
铜覆圆钢	直径（mm）	8	10
铜覆钢绞线	直径（mm）	8	10
铜覆扁钢	截面（mm²）	48	48
	厚度（mm）	4	4

注 1. 铜绞线单股直径不小于 1.7mm。
2. 各类铜覆钢材的尺寸为钢材的尺寸，铜层厚度不应小于 0.25mm。

（8）接地装置的连接应严密可靠，除必须断开处以螺栓连接外，均需焊接。采用铜或铜覆钢材的接地导体（线）应采用放热焊接方式连接。钢接地导体（线）使用搭接焊接方式时，其搭接长度应为扁钢宽度的 2 倍或圆钢直径的 6 倍；采用铜或铜覆钢材的接地导体（线）与接地极的连接，应采用放热焊接；接地导体（线）与电气装置的连接，可采用螺栓连接或焊接。螺栓连接时的允许温度为 250℃，连接处接地导体（线）应适当加大截面，且应设置防松螺帽或防松垫片；接地导体（线）与接地极的连接，接地导体（线）与接地极均为铜（包含铜覆钢材）或其中一个为铜时，应采用放热焊接工艺，被连接的导体应完全包在接头里，连接部位的金属应完全熔化，并应连接牢固。放热焊接接头的表面应平滑，应无贯穿性的气孔。

（9）接地导体（线）和接地极的材质和相应的截面，应计及设计使用年限内土壤对其的腐蚀，通过热稳定校验确定。对绝缘地线长期通电的接地引线及接地装置，必须校验其热稳定和人身安全的防护措施。

接地导体（线）的最大允许温度和接地导体（线）截面的热稳定校验；

$$S_g \geqslant \frac{I_g}{C}\sqrt{t_e} \tag{3-339}$$

式中 S_g——接地导体（线）的最小截面积，mm²；

I_g——流过接地导体（线）的最大接地故障不对称电流有效值，A，按工程设计水平年系统最大运行方式确定；

t_e——接地故障的等效持续时间，s；

C——接地导体（线）材料的热稳定系数，根据材料的种类、性能及最大允许温度和接地故障前接地导体（线）的初始温度确定。

接地导体（线）的初始温度，取 40℃。对钢和铝材的最大允许温度分别取 400℃和 300℃。钢和铝材的热稳定系数 C 分别为 70 和 120。铜和铜覆钢材采用放热焊接方式时的最大允许温度，应根据土壤腐蚀的严重程度经验算分别取 900℃、800℃或 700℃，热稳

定系数 C 值可采用表 3-86 给出的数值。

表 3-86　校验铜和铜覆钢材接地导体（线）热稳定用的稳定系数 C

最大允许温度（℃）	铜	导电率 40% 铜镀钢绞线	导电率 30% 铜镀钢绞线	导电率 20% 铜镀钢棒
700	249	167	144	119
800	259	173	150	124
900	268	179	155	128

土壤电阻率、类别、含盐量、酸碱度和含水量等因素会导致钢材质接地导体（线）、接地极的腐蚀。表 3-87 给出了若干土壤腐蚀情况的参考值。

表 3-87　接地导体（线）和接地极年平均最大腐蚀速率（总厚度）

土壤电阻率（Ω·m）	扁钢腐蚀速率（mm/a）	圆钢腐蚀速率（mm/a）	热镀锌扁钢腐蚀速率（mm/a）
50～300	0.2～0.1	0.3～0.2	0.065
＞300	0.1～0.07	0.2～0.07	0.065

（二）土壤电阻率的判定

GB 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》中列出了不同类别土壤和水的电阻率参考值，现列于表 3-88 以供参考。

表 3-88　土壤和水的电阻率参考值

类别	名称	电阻率近似值（Ω·m）	不同情况下电阻率的变化范围（Ω·m）		
			较湿时（一般地区、多雨区）	较干时（少雨区、沙漠区）	地下水含盐碱时
土	陶黏土	10	5～20	10～100	3～10
土	泥炭、泥灰岩、沼泽地	20	10～30	50～300	3～30
土	捣碎的木炭	40	—	—	—
土	黑土、园田土、陶土	50	30～100	50～300	10～30
土	白垩土、黏土	60			
土	砂质黏土	100	30～100	50～300	10～30
土	黄土	200	100～200	250	30
土	含砂黏土、砂土	300	100～1000	1000以上	30～100
土	河滩中的砂	—	—	—	—
土	煤	—	350	—	—
土	多石土壤	400	—	—	—
土	上层红色风化黏土、下层红色页岩	500（30%湿度）	—	—	—
土	表层土夹石、下层砾石	600（15%湿度）	—	—	—
砂	砂、砂砾	1000	25～1000	1000～2500	—
砂	砂层深度大于10m地下水较深的草原	1000	—	—	—
砂	地面黏土深度不大于1.5m、底层多岩石				
岩石	砾石、碎石	5000	—	—	—
岩石	多岩山地	5000	—	—	—
岩石	花岗岩	200000	—	—	—
混凝土	在水中	40～55	—	—	—
混凝土	在湿土中	100～200	—	—	—
混凝土	在干土中	500～1300	—	—	—
混凝土	在干燥的大气中	12000～18000	—	—	—
矿	金属矿石	0.01～1	—	—	—

计算雷电保护接地装置所采用的土壤电阻率时，应取雷季中最大值，并应按下式计算

$$\rho = \rho_0 \varphi \tag{3-340}$$

式中　ρ ——土壤电阻率，土壤和水的电阻率可按表 3-88 的规定取值，Ω·m；

ρ_0 ——雷季中无雨水时所测得的土壤电阻率，Ω·m；

φ ——土壤干燥时的季节系数，应按表 3-89 的规定取值。测定土壤电阻率时，如土壤比较干燥，则应采用表中较小值，如比较潮湿，则应采用较大值。

表 3-89　　土壤干燥时的季节系数

埋深（m）	φ 值	
	水平接地极	2～3m 的垂直接地极
0.5	1.4～1.8	1.2～1.4
0.8～1.0	1.25～1.45	1.15～1.3
2.5～3.0	1.0～1.1	1.0～1.1

（三）接地装置的工频接地电阻计算

输电线路的杆塔接地，应首先考虑充分利用其本身的自然接地体（包括铁塔基础、钢筋混凝土杆埋入地中的杆段及其底盘、拉线盘等），在自然接地体不能满足要求时，才考虑补充敷设人工接地装置。超高压、特高压由于基础很大，在雷暴日低、土壤电阻率相对较小的区段只要杆塔自然接地电阻满足规程要求值，可取消人工接地。因此，接地设计一般均按如下两步来考虑：①利用自然接地体；②在自然接地体不能满足要求的情况下，可于基础坑中围绕杆塔基础添加环形接地带，或于地表面再添加浅埋（一般埋深为 0.3～1.0m）的接地带、管等接地装置。

用最简单的半球形电极进行接地电阻理论计算，假设土壤电阻率是均匀的，则由半球形电极流入地中的电流 I 在土壤中产生的电流密度为

$$J=\frac{I}{2\pi X^2} \qquad (3\text{-}341)$$

式中　X ——距电极中心的距离，m；

J ——X 处的电流密度，A/m²；

I ——接地极的入地电流，A。

电场强度与电流密度有如下关系：

$$E=\rho J \qquad (3\text{-}342)$$

式中　E ——电场强度，V/m；

ρ ——土壤电阻率，Ω·m。

则半球表面的电位为

$$V=\int_{\infty}^{r} E\mathrm{d}x=\int_{\infty}^{r}\frac{\rho I}{2\pi X^2}\mathrm{d}x=\frac{\rho I}{2\pi r} \qquad (3\text{-}343)$$

半球接地极的接地电阻为

$$R=\frac{V}{I}=\frac{\rho}{2\pi r} \qquad (3\text{-}344)$$

1. 简单人工接地体工频接地电阻计算

人工接地装置一般均由垂直埋设的管、水平敷设的带和环等一些简单的接地体组合而成。

一些简单人工接地体的工频接地电阻计算公式列于表 3-90 中。

表 3-90　　一些简单人工接地体的工频接地电阻计算公式

接地装置型式	工频接地电阻计算公式
	接地引下线或上口紧靠地面的管子（当 $l \geqslant d$ 时）： $R_1=\frac{\rho}{2\pi l}\times\left(\ln\frac{8l}{d}-1\right)$ (3-345) 式中 ρ ——计算用土壤电阻率，Ω·m； l ——管子（或引下线）埋深，m； d ——管子（线）直径，m
	上口埋在地下的管子： $R_2=\frac{\rho}{2\pi l}\times\left(\ln\frac{2l}{d}+\frac{1}{2}\ln\frac{4h+l}{4h-l}\right)$ (3-346) 式中 h——地面到管子长度之半间的距离，m
	浅埋的水平接地体： $R_3=\frac{\rho}{2\pi l}\times\left(\ln\frac{l^2}{hd}\right)$ (3-347) 式中 d——接地体直径，m
	深埋（于基础坑）的接地环： $R_4=\frac{\rho}{2\pi^2 D}\times\left(\ln\frac{8D}{d}+\frac{\pi D}{4h}\right)$ (3-348) 式中 D——环的直径，m

在表 3-90 的计算公式中，若接地体不是用圆管及圆钢，而是用其他型式的钢材时，则可将其折算成等效圆形断面并代入表中公式来计算，此时，其等效直径为

扁铁：$d=b/2$，b 为扁铁宽度；

等边角钢：$d=0.84b$，b 为角钢翼宽；

不等边角钢：$d=0.71\times[b_1b_2(b_1^2+b_2^2)]^{0.25}$，$b_1$、$b_2$ 为角钢翼宽；

等边槽钢：$d=0.92\times[b^2h^3(b^2+h^2)]^{\frac{1}{9}}$，$b$ 为槽钢边宽，h 为槽钢高度。

若深埋（于基础坑）之接地环为边长 $A \cdot B$ 之矩形环时，则可用一直径为 $D=\sqrt{\frac{4AB}{\pi}}$ 之等价圆形环代替。

为了简化计算，GB 50065—2011 中列出了简易公式，见表 3-91。

表 3-91 人工接地体的工频接地电阻简易计算公式 Ω

接地体型式	简易计算公式	备注
垂直式	$R\approx0.3\rho$	长度 3m 左右的接地体
单根水平式	$R\approx0.03\rho$	长度 60m 左右的接地体
复合式	$R\approx0.5\dfrac{\rho}{\sqrt{S}}=0.28\dfrac{\rho}{r}$ 或 $R\approx\dfrac{\sqrt{\pi}}{4}\dfrac{\rho}{\sqrt{S}}+\dfrac{\rho}{L}=\dfrac{\rho}{4r}+\dfrac{\rho}{L}$	（1）面积 S 大于 100m² 的闭合接地网；（2）r 为与接地网面积 S 等价的圆半径，即等效半径，m。L 为接地体总长，m

2. 复合式人工接地装置工频接地电阻计算

复合式人工接地装置由管、带、环等简单人工接地体组合而成。目前在计算方法上主要有互电阻精确计算法、利用系数法、形状系数法三种。

（1）精确计算法。

接地参数计算的困难在于从单位长度导体流入地中的电流分布并不清楚。细长直线型导体的接地极中，流入地中的电流的线密度，在末端要比在导体中间大得多。网状接地极中最大电流密度在边上，尤其在地网边角上，所以接地参数的计算和电流分布密切相关。为此目的，将接地体分割为尺寸足够小的几段或几十段（称为离散化）。然后利用地中电流场和静电场的相似性，建立麦克斯韦方程组进行数值求解。如果每个接地极作为一个单元即不分段（不离散化），虽然也可进行数值求解但不能称为准确计算法而称为近似计算法。

$$\left.\begin{aligned}U_1&=R_{11}I_1+R_{12}I_2+\cdots+R_{1n}I_n\\U_2&=R_{21}I_1+R_{22}I_2+\cdots+R_{2n}I_n\\&\cdots\\U_k&=R_{k1}I_1+R_{k2}I_2+\cdots+R_{kn}I_n\\U_n&=R_{n1}I_1+R_{n2}I_2+\cdots+R_{nn}I_n\end{aligned}\right\}\tag{3-349}$$

式中：R_{ki} 为接地极的自电阻（$k=i$ 时）和互电阻（$k\neq i$ 时）；I_i 为各接地元件的电流（i=1，2，…，n）；自然数 i，$k\leqslant n$。

在接地计算中通常都忽略导体元件自身的电压降，因此

$$U_1=U_2=\cdots=U_k=\cdots=U_n=U\tag{3-350}$$

通常实用计算中是任意假设一个 U 值，然后解方程组［式（3-349）］计算电流 I_i，最后计算 $R=U/I$，其中 $I=\sum\limits_{i=1}^{n}I_i$。

这样，复杂接地极（网）接地电阻的计算问题，就归结为各接地元件的自电阻和相关元件的互电阻的计算及求解麦克斯韦方程组的问题。

自电阻和互电阻通常均可采用平均电位法进行计算。接地技术中的麦克斯韦方程组是半空间的，因此其自电阻和互电阻都是半空间的。

平均电位法认为第二个导体对第一个导体的感应电位等于前者磁场对后者磁场所有点引起电位数值上的平均值。自电阻可用表 3-90 中的公式，但注意应进行离散化处理。互电阻公式可用如下方法求取：

设有两条细长导线，长度为 l_1 和 l_2，则这两个导线计算接地电阻时的半空间互电阻为

$$R_{12}=R_{21}=\frac{\rho}{2\pi}\int_{l_1}\int_{l_2}\frac{\mathrm{d}l_1\cdot\mathrm{d}l_2}{D}\tag{3-351}$$

式中 ρ——计算用土壤电阻率，Ω·m；
$\mathrm{d}l_1$、$\mathrm{d}l_2$——线 l_1 和 l_2 的长度元素；
D——这些长度元素间的距离。

（2）利用系数法。

利用系数法的基本要点是计算出单个（如单根管、带、环等）人工接地体的接地电阻后，按通常的方法计算其并联电阻值，然后再增添一个反映接地体间相互屏蔽影响的利用系数，即得出综合的工频接地电阻值，其计算公式见表 3-92。

表 3-92 复合式人工接地装置的工频接地电阻计算公式（利用系数法）

接地装置型式	简图	计 算 公 式
n 根水平射线的复合接地装置	l l	$R_5=\dfrac{R_3}{n}\times\dfrac{1}{\eta}$ （3-352） 式中 R_3——一根射线的接地电阻，可按式（3-351）计算； η——工频利用系数

续表

接地装置型式	简图	计　算　公　式
敷设在基坑底部的深埋接地环和引线的复合接地装置		$$R_6=\frac{R_4\times\frac{R_1}{n}}{R_4+\frac{R_1}{n}}\times\frac{1}{\eta}$$ （3-353） 式中　R_1、R_4——引下线及深埋环的电阻值，可用式（3-349）及式（3-352）计算； n——引下线数； η——工频利用系数
引下线、深埋环和水平射线的复合接地装置		$$R_7=\frac{R_5\times R_6}{R_5+R_6}\times\frac{1}{\eta}$$ （3-354） 式中　R_5、R_6——可利用式（3-352）及式（3-353）计算； η——工频利用系数
		$$\left.\begin{aligned}R_8'&=\frac{R_5\times R_6}{R_5+R_6}\times\frac{1}{\eta'}\\R_8&=\frac{R_8'}{4}\times\frac{1}{\eta}\end{aligned}\right\}$$ （3-355） 式中　R_8'、R_8——单个环、带及四个环、带的电阻； η'、η——单个环、带及四个环带的工频利用系数
垂直电极和水平射线的复合接地装置		$$\left.\begin{aligned}R'&=\frac{R_2}{n}\times\frac{1}{\eta'}\\R_9&=\frac{R'\times R_5}{R+R_5}\times\frac{1}{\eta}\end{aligned}\right\}$$ （3-356） 式中　R_2——可利用式（3-346）计算； R_5——可利用式（3-352）计算； η'、η——垂直电极、垂直电极和水平射线的工频利用系数

注　表中各利用系数 η 和 η' 等数值的选取可参见表 3-97 的表下注。

（3）形状系数法。

GB 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》中采用形状系数法进行接地电阻计算，计算水平敷设的复合式人工接地装置的工频接地电阻 R_P 的计算公式为

$$R_P=\frac{\rho}{2\pi L}\times\left(\ln\frac{L^2}{td}+A\right) \tag{3-357}$$

式中　ρ——土壤电阻率，Ω·m；

L——水平接地体的总长度，m；

t——水平接地体的埋设深度，m；

d——水平接地体的直径或等效直径，m；

A——水平接地体的形状系数，见表 3-93 和表 3-94。

表 3-93　　水平接地体的形状系数 A 的取值

接地体的形状	—	L	人	+	米(6)	米(8)	□	○	米(6)*	米(8)*
A	−0.6	−0.18	0	0.89	3.03	5.65	1	0.48	2.19	4.71

表 3-94　不同接地装置种类中的 A 和 L 的取值

接地装置种类	形状	参数
铁塔接地装置	l_1 l_2	$A=1.76$ $L=4\times(l_1+l_2)$
钢筋混凝土杆放射型接地装置	l_1 l_2	$A=2.0$ $L=4\times(l_1+l_2)$
钢筋混凝土杆环型接地装置	l_1 l_2	$A=1.0$ $L=8l_2$（当 $l_1=0$） $L=4l_1$（当 $l_1\neq0$）

（4）GB 50065—2011 给出的均匀土壤中水平接地极为主边缘闭合的复合接地极（接地网）的接地电阻计算公式为

$$R_n=\alpha_1 R_e \tag{3-358}$$

$$\alpha_1=\left(3\ln\frac{L_0}{\sqrt{S}}-0.2\right)\times\frac{\sqrt{S}}{L_0} \tag{3-359}$$

$$R_e=0.213\times\frac{\rho}{\sqrt{S}}(1+B)+\frac{\rho}{2\pi L}\times\left(\ln\frac{S}{9hd}-5B\right) \tag{3-360}$$

$$B=\frac{1}{1+4.6\dfrac{h}{\sqrt{S}}} \tag{3-361}$$

式中　R_n——任意形状边缘闭合接地网的接地电阻，Ω；

R_e——等值（即等面积、等水平接地极总长度）方形接地网的接地电阻，Ω；

S——接地网的总面积，m²；

d——水平接地极的直径或等效直径，m；

h——水平接地极的埋设深度，m；

L_0——接地网的外缘边线总长度，m；

L——水平接地极的总长度，m。

为了简化计算，GB 50065—2011 列出了复合水平接地网的简易估算公式，见表 3-92。该估算公式是参考了国外常用的估算方法列出的。

使用上述公式进行较大面积的接地网计算时，应特别注意 ρ 值的选取。一般应取主要接地体埋深处的数值，特别是土壤电阻率不均匀时，应考虑地层深处 ρ 值的影响，取有代表意义的数值。

3. 杆塔自然接地体及其与人工接地装置组合的工频接地电阻计算

试验表明，当土壤中有水分时，由于混凝土具有毛细管作用而吸收水分，使其具有导电性。表 3-88 所示列出了在各种状态下混凝土的电阻率。由表中所列数值可以看出，在湿状态下其电阻率十分接近于水或土壤的电阻率。因此，在接地设计中，特别对土壤电阻率不太高的地区，利用杆塔自然接地体是非常必要的。

杆塔自然接地体及其与人工接地装置组合的工频接地电阻计算公式见表 3-95。

表 3-95　杆塔自然接地体及其与人工接地装置组合的工频接地电阻计算公式

接地装置型式	简图	计　算　公　式
钢筋混凝土杆或桩基础	l d	$$\left.\begin{aligned}R''&=\frac{1.4\rho}{2\pi l}\times\ln\frac{4l}{d}\\R_{10}&=\frac{R''}{n\eta}\end{aligned}\right\}\qquad(3\text{-}362)$$ 式中　ρ——土壤电阻率，Ω·m； d——钢筋骨架的直径，m； l——埋深，m； 1.4——考虑混凝土层的影响及钢筋骨架与光滑圆筒差别的综合校正系数； n——一基杆塔的桩基根数； η——工频利用系数
拉线盘		$$\left.\begin{aligned}R'&=\frac{\sqrt{\pi}}{5\sqrt{S}}\times\rho\\R_{11}&=\frac{R'}{n\eta}\end{aligned}\right\}\qquad(3\text{-}363)$$ 式中　S——拉线盘的面积，m； n——拉线盘数

续表

接地装置型式	简图	计算公式
装配式钢筋混凝土基础		底座：$R_D=\frac{\rho}{2D}$，$D=\sqrt{\frac{4AB}{\pi}}$ （3-364） 式中 D——底座的等效直径，m； A、B——底座的边长，m。 柱的计算公式见式（3-362）。 底座和柱的联合计算公式为 $R_{12}=\frac{R''R_D}{R''+R_D}\times\frac{1}{\eta}$ （3-365） 一基塔的总接地电阻为 $R_{13}=\frac{R_{12}}{n}\times\frac{1}{\eta}$ （3-366） 式中 n——每基塔的基础数； η——工频利用系数； R'' 按式（3-362）计算，R_D 按式（3-364）计算
敷设在基坑底部的深埋接地及钢筋混凝土基础		$R_{14}=\frac{R_6R_{13}}{R_6+R_{13}}\times\frac{1}{\eta}$ （3-367） 式中 η——工频利用系数； R_6 按式（3-353）计算，R_{13} 按式（3-366）计算
沿每个基坑单独敷设的深埋接地及钢筋混凝土基础		$R_{15}=\frac{R_6R_{12}}{R_6+R_{12}}\times\frac{1}{\eta}$，$R_{16}=\frac{R_{15}}{4}\times\frac{1}{\eta}$ （3-368） 式中 R_{16}——一基塔的总电阻； η——工频利用系数； R_6 按式（3-353）计算，R_{12} 按式（3-365）计算

注 各工频利用系数的选取可参见表 3-97。

4. 各型接地装置（包括自然接地）的工频接地电阻简易计算

为了简化计算，GB 50065—2011 中列出了各型接地装置的工频接地电阻简易计算公式见表 3-96。

表 3-96 各种型式接地装置的工频接地电阻简易计算式 Ω

接地装置型式	杆塔型式	接地电阻简易计算式
n 根水平射线（$n\leqslant$12，每根长约 60m）	各型杆塔	$R\approx\frac{0.062\rho}{n+1.2}$
沿装配式基础周围敷设的深埋式接地极	铁塔	$R\approx0.07\rho$
	门型杆塔	$R\approx0.04\rho$
	V 型拉线的门型杆塔	$R\approx0.045\rho$
装配式基础的自然接地极	铁塔	$R\approx0.1\rho$
	门型杆塔	$R\approx0.06\rho$
	V 型拉线的门型杆塔	$R\approx0.09\rho$
钢筋混凝土杆的自然接地极	单杆	$R\approx0.3\rho$
	双杆	$R\approx0.2\rho$
	拉线单、双杆	$R\approx0.1\rho$
	一个拉线盘	$R\approx0.28\rho$
深埋式接地与装配式基础自然接地的综合	铁塔	$R\approx0.05\rho$
	门型杆塔	$R\approx0.03\rho$
	V 型拉线的门型杆塔	$R\approx0.04\rho$

注 表中ρ为土壤电阻率，Ω·m。

（四）接地装置的冲击接地电阻计算

1. 冲击接地电阻的概念

雷电流通过接地装置向大地扩散时，起作用的是接地装置的冲击接地电阻而不是工频接地电阻。

冲击接地电阻是指接地体通过雷电流时的冲击电压幅值与冲击电流幅值之比。

冲击接地电阻与工频接地电阻是不相同的。这主要是由于冲击雷电流的幅值很高，接地体的电位很高，使得紧靠接地体周围的土壤被击穿而发生强烈的火花放电，这仿佛扩大了接地导体的直径，从而使得接地体在冲击雷电流下所呈现的冲击接地电阻 R_i 要比工频接地电阻 R 小得多（特别对于集中接地装置）。另外，雷电流相当于历时很短的高频冲击波，接地导体本身的电感将起阻碍电流通过的作用，这一效应将阻碍着雷电流向长接地体末端的扩散，使末端不能有效地向地中导泄电流。因此，对于长接地体，除上述因土壤击穿而使其冲击接地电阻具有降低的趋势外，又有因电感作用使接地体不能充分利用而使其增大的趋势。因此，长接地体的冲击接地电阻有时比工频接地电阻还大。

2. 冲击接地电阻和接地体的冲击系数

通常把冲击接地电阻 R_i 与工频接地电阻 R 的比叫作接地体的冲击系数 α。

接地体的冲击系数 α 与单独接地体的形状、尺寸、冲击电流数值以及土壤电阻率有关。各型人工接地体和线路自然接地体的冲击系数，根据 GB 50065—2011 推荐，可按以下公式计算。

（1）铁塔接地装置的冲击系数为

$$a = 0.74\rho^{-0.4}(7+\sqrt{L})\times\left[1.56-\exp(-3I_i^{-0.4})\right] \tag{3-369}$$

式中 I_i ——流过杆塔接地装置或单独接地极的冲击电流，kA；

ρ ——土壤电阻率，Ω · m。

（2）钢筋混凝土杆放射型接地装置的冲击系数为

$$a = 1.36\rho^{-0.4}(1.3+\sqrt{L})\times\left[1.55-\exp(-4I_i^{-0.4})\right] \tag{3-370}$$

（3）钢筋混凝土杆环型接地装置的冲击系数为

$$a = 2.94\rho^{-0.5}(6+\sqrt{L})\times\left[1.23-\exp(-2I_i^{-0.3})\right] \tag{3-371}$$

（4）单独接地极接地电阻的冲击系数。

垂直接地极，可按下式计算：

$$a = 2.75\rho^{-0.4}(1.8+\sqrt{L})\times\left[0.75-\exp(-1.5I_i^{-0.2})\right] \tag{3-372}$$

单端流入冲击电流的水平接地极，可按下式计算：

$$a = 1.62\rho^{-0.4}(5+\sqrt{L})\times\left[0.79-\exp(-2.3I_i^{-0.2})\right] \tag{3-373}$$

中部流入冲击电流的水平接地极，可按下式计算

$$a = 1.16\rho^{-0.4}(7.1+\sqrt{L})\times\left[0.78-\exp(-2.3I_i^{-0.2})\right] \tag{3-374}$$

（5）$\rho \leqslant 300\Omega \cdot m$ 时可计及杆塔自然接地极的作用。其冲击系数可利用下式计算：

$$a = \frac{1}{1.35+a_1 I_i^{1.5}} \tag{3-375}$$

式中：a_1 对钢筋混凝土杆、钢筋混凝土桩和铁塔的基础（一个塔脚）为 0.053；对装配式钢筋混凝土基础（一个塔脚）和拉线盘（带拉线棒）为 0.038。

3. 冲击接地电阻计算

单独接地极或杆塔接地装置的冲击接地电阻，可按下式计算：

$$R_i = \alpha R \tag{3-376}$$

式中 R_i ——单独接地极或杆塔接地装置的冲击接地电阻，Ω；

R ——单独接地极或杆塔接地装置的工频接地电阻，Ω；

α ——单独接地极或杆塔接地装置的冲击系数。

整个接地装置（包括自然接地体）的综合冲击接地电阻计算可按前款所述工频接地电阻计算办法进行，只是将公式中的工频利用系数换成冲击利用系数，将各单个接地体的工频接地电阻折算成冲击接地电阻即可。

如由 n 根等长水平放射形接地体组成的接地装置，其冲击接地电阻可按下式计算

$$R_i = \frac{R_i'}{n}\times\frac{1}{\eta_i} \tag{3-377}$$

式中 R_i' ——每根水平放射形接地体的冲击接地电阻，Ω；

η_i ——考虑各接地体间相互影响的冲击利用系数。

又如，由水平接地体连接的 n 根垂直接地体组成的接地装置，其冲击接地电阻可按下式计算

$$R_i = \frac{\frac{R_{vi}}{n}\times R_{hi}}{\frac{R_{vi}}{n}+R_{hi}}\times\frac{1}{\eta_i} \tag{3-378}$$

式中 R_{vi} ——每个垂直接地体的冲击接地电阻，Ω；

R_{hi} ——每个水平接地体的冲击接地电阻，Ω；

η_i ——接地体的冲击利用系数，按 GB 50065—2011 推荐可由表 3-97 选取。

表 3-97 接地极的冲击利用系数η_i

接地极型式	接地导体（线）的根数	冲击利用系数	备注
n根水平射线（每根长10～80m）	2	0.83～1.0	较小值用于较短的射线
	3	0.75～0.90	
	4～6	0.65～0.80	
以水平接地极连接的垂直接地极	2	0.80～0.85	$\frac{D(垂直接地极间距)}{l(垂直接地极长度)}=2\sim3$ 较小值用于$\frac{D}{l}=2$时
	3	0.70～0.80	
	4	0.70～0.75	
	6	0.65～0.70	
自然接地极	拉线棒与拉线盘间	0.6	
	铁塔的各基础间	0.4～0.5	
	门型、各种拉线杆塔的各基础间	0.7	

注 工频利用系数η，一般取为$\eta\approx\eta_i/0.9\leqslant1$，但对自然接地$\eta\approx\eta_i/0.7$。

（五）工程常用接地装置图

表 3-98～表 3-105 所列为各型接地装置一览。

表 3-98 单杆及单基础铁塔接地装置一览表

接地装置正面图（mm）										
接地装置平面图（mm）										
接地装置型式	b				c				d	
土壤电阻率（Ω·m）	1×10^2		3×10^2		6×10^2		10×10^2		20×10^2	
工频电阻值不大于（Ω）	10		15		20		20		30	
接地型号	D_{1b}	D_{1d}	D_{3b}	D_{3d}	D_{6c}	D_{6d}	D_{10c}	D_{10d}	D_{20c}	D_{20d}
接地装置尺寸（m）	$l_1=17$	$l_3=0$	$l_1=40$	$l_3=7$	$l_2=40$	$l_3=15$	$l_2=70$	$l_3=30$	$l_2=95$	$l_3=40$
材料 接地体ϕ12镀锌圆钢（kg/m）	16.47/18.5	21.36/24	36.94/41.5	46.28/52	72.98/82	75.65/85	126.38/142	129.05/145	170.88/192	164.65/185
材料 引下线ϕ12镀锌圆钢（kg/m）	1.6/1.8	1.6/1.8	1.6/1.8	1.6/1.8	1.6/1.8	1.6/1.8	1.6/1.8	1.6/1.8	1.6/1.8	1.6/1.8
材料 45×4镀锌扁钢（kg/m）	0.3/0.19	0.3/0.19	0.3/0.19	0.3/0.19	0.3/0.19	0.3/0.19	0.3/0.19	0.3/0.19	0.3/0.19	0.3/0.19
材料 总质量（kg）	18.34	23.26	38.84	48.18	74.88	77.55	128.28	130.95	172.78	166.55
土方量（m³）	4	5	10	11.0	19	19	33	33	45	43

注 1. 接地型号含义：例D_{3b}，D表示单杆或单基础铁塔，3表示土壤电阻率值，b表示接地装置型式（d型用于居民区，其他接地型号也是如此表示）。

2. 土方量按挖0.6m深、0.4m宽的沟计算。

表 3-99　　双杆接地装置一览表

项目									
接地装置正面图（mm）									
接地装置平面图（mm）									
接地装置型式	b			c			d		
土壤电阻率（Ω·m）	1×10²		3×10²		6×10²		10×10²		20×10²
工频电阻值不大于（Ω）	10		15		20		20		30
接地型号	S_{1b}	S_{1d}	S_{3b}	S_{3d}	S_{6c}	S_{6d}	S_{10c}	S_{10d}	S_{20d}
接地装置尺寸（m）	$l_2=8$	$l_4=0$	$l_2=20$	$l_4=5$	$l_3=20$	$l_4=15$	$l_3=30$	$l_4=25$	$l_4=40$
材料：接地体 $\phi12$ 镀锌圆钢（kg/m）	17.8/20	35.6/40	39.16/44	55.18/62	84.55/95	90.78/102	120.15/135	126.38/142	179.78/202
材料：引下线 $\phi12$ 镀锌圆钢（kg/m）	3.2/3.6	3.2/3.6	3.2/3.6	3.2/3.6	3.2/3.6	3.2/3.6	3.2/3.6	3.2/3.6	3.2/3.6
材料：45×4 镀锌扁钢（kg/m）	0.6/0.38	0.6/0.38	0.6/0.38	0.6/0.38	0.6/0.38	0.6/0.38	0.6/0.38	0.6/0.38	0.6/0.38
材料：总质量（kg）	21.6	39.4	42.96	58.98	88.35	94.58	123.95	130.18	183.58
土方量（m³）	4	8	8	12	18	20	26	28	48

注　1. 接地型号含义，如 S_{3d}，S 表示双杆，3 表示土壤电阻率值，d 表示接地装置型式。

2. 材料及土方量按 l_1 为 10m 计算（l_1 值等于根开 +1.5m）。

表 3-100　　铁塔接地装置一览表

项目					
接地装置正面图（mm）					
接地装置平面图（mm）					
接地装置型式	T_1		T_3～T_{20}		
土壤电阻率（Ω·m）	1×10²	3×10²	6×10²	10×10²	20×10²
工频电阻值不大于（Ω）	10	15	20	20	30
接地型号	T_1	T_3	T_6	T_{10}	T_{20}
接地装置尺寸（m）		$L=10$	$L=15$	$L=30$	$L=45$
材料：接地体 $\phi12$ 镀锌圆钢（kg/m）	21.36/24	37.38/42	55.18/62	108.58/122	161.98/182
材料：引下线 $\phi12$ 镀锌圆钢（kg/m）	8.9/10	6.4/7.2	6.4/7.2	6.4/7.2	6.4/7.2
材料：45×4 镀锌扁钢（kg/m）	1.2/0.76	1.2/0.76	1.2/0.76	1.2/0.76	1.2/0.76
材料：总质量（kg）	31.46	47.48	65.28	118.68	172.08
土方量（m³）	0	10	13	25	36

注　1. T_1 型接地装置，环应尽量靠近基础坑边。

2. 接地型号含义，如 T_1、T 表示宽铁塔，1 表示土壤电阻率值。

表 3-101　　铁塔接地装置一览表（接地模块）

型号			TJ20	TJ30	TJ40	TJ50	TJ60	TJ90	TJ100
土壤电阻率（Ω·m）			2000	3000	4000	5000	6000	6000＜ρ≤9000	ρ＞9000
杆塔型式			自立塔	自立塔	自立塔	自立塔	自立塔	自立塔	自立塔
接地装置布置示意图（m）									
最大允许工频电阻（Ω）			25	30	30	30	30	30	30
材料表	镀锌圆钢ϕ12（方框＋射线L总长）	长度（m）/质量（kg）	144/127.87	168/149.18	216/191.81	276/245.09	340/301.92	508/451.10	528/468.86
	镀锌圆钢ϕ12（引下线）	长度（m）/质量（kg）	12/10.66	12/10.66	12/10.66	12/10.66	12/10.66	12/10.66	12/10.66
	镀锌扁钢210×40×5	长度（m）/质量（kg）	0.76/1.20	0.76/1.20	0.76/1.20	0.76/1.20	0.76/1.20	0.76/1.20	0.76/1.20
	可拆卸式防盗螺栓M16×65	长度（m）/质量（kg）	8	8	8	8	8	8	8
接地开挖土方量（m³）			58.0/44.3/23.8	69.6/53.3/28.8	88.9/68.0/36.7	116.0/88.9/48.2	140.5/107.5/58.1	222.0/170.5/93.4	228.4/175.3/95.8
总质量（kg）			141.34	162.65	205.28	258.56	315.39	464.57	482.33
模块个数			12	16	20	28	32	50	60

注　1. TJ 型接地装置，环应尽量靠近基础坑边。
　　2. 接地型号含义：例 TJ20，TJ 表示宽基铁塔带接地模块接地，20 表示土壤电阻率值。

表 3-102 铁塔接地装置一览表（铜覆钢）

型号			TCT-3	TCT-5	TCT-10	TCT-15	TCT-20
土壤电阻率（Ω·m）			$\rho \leqslant 500$	$300 < \rho \leqslant 500$	$500 < \rho \leqslant 1000$	$1000 < \rho \leqslant 1500$	$1500 < \rho \leqslant 2000$
杆塔型式			自立塔	自立塔	自立塔	自立塔	自立塔
接地沟开挖示意图（m）			18m	18m, 18m, L	18m, 18m, L	18m, 18m, L	18m, 18m, L
最大允许工频电阻（Ω）			15	15	20	25	25
射线 L 长度（m）			0	5	10	20	35
材料表	铜覆圆钢 $\phi 10$（圆框 + 射线 L 总长）	长度(m)/质量(kg)	72/44.39	92/56.72	112/69.05	152/93.71	212/130.70
	镀锡铜覆钢圆线 $\phi 10$（引下线）	长度(m)/质量(kg)	12/7.40	12/7.40	12/7.40	12/7.40	12/7.40
	扁钢 210×40×5	长度(m)/质量(kg)	0.76/1.20	0.76/1.20	0.76/1.20	0.76/1.20	0.76/1.20
	螺栓、螺母和垫片 M16×65	（套/kg）	8/1.608	8/1.608	8/1.608	8/1.608	8/1.608
总质量（kg）			54.60	66.93	79.26	103.92	140.91
接地开挖土方量（m^3）			23.0/17.3/8.6	29.5/22.1/11.1	35.8/26.9/13.4	48.6/56.5/18.2	67.8/50.9/25.4
镀铜钢棒数量（根）			0	0	0	0	0
煅烧石油焦炭（kg）			0	0	0	0	0

注 1. TCT 型接地装置，环应尽量靠近基础坑边。
2. 接地型号含义，如 TCT-3，TCT 表示宽基铁塔铜覆钢接地，3 表示土壤电阻率值。

表 3-103　　铁塔接地装置一览表（铜覆钢＋垂直接地体）

型号			TCT-30	TCT-40	TCT-50	TCT-60	TCT-90	TCT-100
土壤电阻率（Ω·m）			$2000<\rho\leqslant3000$	$3000<\rho\leqslant4000$	$4000<\rho\leqslant5000$	$5000<\rho\leqslant6000$	$6000<\rho\leqslant9000$	$\rho>9000$
杆塔型式			自立塔	自立塔	自立塔	自立塔	自立塔	自立塔
接地沟开挖示意图（m）			镀铜钢棒等距布置；18m；L	镀铜钢棒等距布置；18m；L	镀铜钢棒等距布置；18m；L	镀铜钢棒等距布置；18m；L	镀铜钢棒等距布置；18m；L	镀铜钢棒等距布置；18m；L
最大允许工频电阻（Ω）			30	30	30	30	30	30
射线 L 长度（m）			30	40	30	40	40	60
材料表	铜覆圆钢 $\phi10$（围框＋射线 L 总长）	长度(m)/质量(kg)	192/118.37	252/143.03	252/155.36	312/192.35	392/241.67	552/340.31
	镀锡铜覆圆钢 $\phi10$（引下线）	长度(m)/质量(kg)	12/7.40	12/7.40	12/7.40	12/7.40	12/7.40	12/7.40
	扁钢 210×40×5	长度(m)/质量(kg)	0.76/1.20	0.76/1.20	0.76/1.20	0.76/1.20	0.76/1.20	0.76/1.20
	螺栓、螺母和垫片 M16×65	（套/kg）	8/1.608	8/1.608	8/1.608	8/1.608	8/1.608	8/1.608
接地开挖土方量（m^3）			61.4/46.1/23.0	74.2/55.7/27.8	80.6/60.5/30.2	99.8/74.9/37.4	125.4/94.1/47.0	176.6/132.5/66.2
$\phi15$ 铜覆钢棒数量（5m/根）			16	20	24	28	28	36
煅烧石油焦炭（kg）			640	800	960	1200	1440	1520
总质量（kg）			239.55	291.96	332.03	396.76	446.08	600.21

注　1. TCT 型接地装置，环应尽量靠近基础坑边。
　　2. 接地型号含义，如 TCT-30，TCT 表示宽基铁塔铜覆钢接地，30 表示土壤电阻率值。

表 3-104　　铁塔接地装置一览表（柔性石墨缆）

型号			TCS-5	TCS-10	TCS-15	TCS-20
土壤电阻率（Ω·m）			$\rho \leqslant 500$	$500 < \rho \leqslant 1000$	$1000 < \rho \leqslant 1500$	$1500 < \rho \leqslant 2000$
杆塔型式			自立塔	自立塔	自立塔	自立塔
接地沟开挖示意图（m）			18m 18m	18m 18m L	18m 18m L	18m 18m L
最大允许工频电阻（Ω）			10/15	20	25	25
射线 L 长度（m）			0	9	17	34
材料表	ϕ28 围框＋射线 L 总长	长度(m)/质量(kg)	72/36	108/54	140/70	208/104
	ϕ28 高强石墨引下线	长度(m)/质量(kg)	12/12	12/12	12/12	12/12
	石墨布 200×5	长度(m)/质量(kg)	0/0	4×5/4	4×10/8	4×15/12
	螺栓、螺母和垫片 M16×65	（套/kg）	8/1.608	8/1.608	8/1.608	8/1.608
	引下线连接件	（套/kg）	4/3.2	4/3.2	4/3.2	4/3.2
	水平接地体连接件 PA 尼龙非金属连接件	（套/kg）	4/2	8/4	8/4	8/4
接地开挖土方量（m^3）埋深 0.8m/0.6m/0.3m，宽 0.4m			23.04/17.28/8.64	34.56/25.92/12.96	44.80/33.60/16.80	66.56/49.92/24.96
总质量（kg）			54.8	78.8	98.8	136.8

注　1. TCS 型接地装置，环应尽量靠近基础坑边。
2. 接地型号含义，如 TCS-3，TCS 表示宽基铁塔柔性石墨缆接地，3 表示土壤电阻率值。

表 3-105 铁塔接地装置一览表（柔性石墨缆＋石墨布）

型号			TCS-30	TCS-40	TCS-50	TCS-60	TCS-90	TCS-100
土壤电阻率（Ω·m）			2000＜ρ≤3000	3000＜ρ≤4000	4000＜ρ≤5000	5000＜ρ≤6000	6000＜ρ≤9000	ρ＞9000
杆塔型式			自立塔	自立塔	自立塔	自立塔	自立塔	自立塔
接地沟开挖示意图（m）								
最大允许工频电阻（Ω）			30	30	30	30	30	30
射线 L 长度（m）			30	40	50	50	50	50
材料表	围框＋射线 L 总长	长度(m)/质量(kg)	312/156	392/196	472/236	472/236	472/236	472/236
	ϕ28 高强石墨引下线	长度(m)/质量(kg)	12/12	12/12	12/12	12/12	12/12	12/12
	石墨布 200×5	长度(m)/质量(kg)	8×10/16	8×15/24	8×20/32	8×30/48	8×40/64	8×50/80
	螺栓、螺母和垫片 M16×65	（套/kg）	8/1.608	8/1.608	8/1.608	8/1.608	8/1.608	8/1.608
	引下线连接件	（套/kg）	4/32	4/3.2	4/3.2	4/32	4/32	4/32
	水平接地体连接件 PA 尼龙非金属连接件	（套/kg）	12/6	12/6	12/6	12/6	12/6	12/6
接地开挖土方量 埋深 0.8m/0.6m/0.3m，宽 0.4m		（m^3）	99.84/74.88/37.44	125.44/94.08/47.04	151.04/113.28/56.64	151.04/113.28/56.64	151.04/113.28/56.64	151.04/113.28/56.64
总质量（kg）			194.8	242.8	290.8	306.8	322.8	338.8

注 1. TCS 型接地装置，环应尽量靠近基础坑边。
2. 接地型号含义，如 TCS-30，TCS 表示宽基铁塔柔性石墨缆接地，30 表示土壤电阻率值。

（六）高土壤电阻率地区的接地

高土壤电阻率地区的接地，多年来一直是一个没有圆满解决的问题。为此，不少人曾进行过各种各样的研究。但总的来看，不外乎采用土壤的化学处理（如降阻剂）、换土、采用伸长接地带（有时辅助以引外接地）等几种措施。由实践看，前两项办法由于费工费时、维护工作量大。因此，一般不适于在输电线路上使用。对输电线路来讲，在高土壤电阻率地区降低接地电阻有效的办法则是采用伸长接地带（有时辅助以引外接地或接地模块）或连续伸长接地体。

1. 伸长接地带在高土壤电阻率地区的应用

雷电冲击电流通过接地体的最初瞬间，以及冲击电流在特高土壤电阻率地区伸长接地带中的传播，其冲击阻抗均决定于波阻。地中接地带的波阻 z_0 可由下式得到

$$z_0=\sqrt{\frac{L'}{C'}}=\sqrt{\frac{\varepsilon\mu}{C'}}=\frac{L'}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \tag{3-379}$$

$$\varepsilon=\varepsilon_r\times\frac{1}{4\pi\times9\times10^9} \tag{3-380}$$

式中　ε——介电系数；

ε_r——相对介电系数，可参照表3-106选取；

μ——导磁系数。由于地的相对导磁系数 μ_r 近似为1，故 $\mu=\mu_r\mu_0=4\pi\times10^{-7}$，H/m；

C'——接地体单位长度电容，F/m；

L'——接地体单位长度外电感，H/m。

一根水平接地体单位长度的外电感，为

$$L'=\frac{1}{l}\times\left[\frac{\mu_0 l}{2\pi}\times\left(\ln\frac{4l}{d}-1\right)\right]=2\times10^{-7}\times\left(\ln\frac{4l}{d}-1\right) \tag{3-381}$$

式中　l——接地体长度，m；

d——接地体直径，m。

通常，$L'\approx1.7\sim1.8\mu H/m$。若取 $L'\approx1.7\mu H/m$，则由式（3-379）求得一根水平接地带的波阻 z_0 为

$$z_0=\frac{3\times10^8}{\sqrt{\varepsilon_r}}\times1.7\times10^{-6}=\frac{510}{\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{3-382}$$

当 ε_r=4～15 时，z_0=150～255Ω。这一数值和国内、外的试验结果基本吻合。

表 3-106　　地的相对介电系数

岩石名称	花岗岩	正长岩	闪长岩	玄武岩	片麻岩	大理岩	石灰岩	砂岩	土壤	水
相对介电系数 ε_r	7～12	13～14	8～9	12	8～15	8	15	9～11	2～20	≈80

原东北电业管理局技术改进局曾以Π型链形回路对土壤电阻率 ρ=1200～5000Ω·m 情况下不同长度接地带的阻抗—时间特性进行了试验。通过试验发现，在 ρ=1200～5000Ω·m 的范围内，当土壤电阻率相同时，若接地带总长度相等，则用多根较短的接地带比用根数少而长的接地带，其阻抗起始值（即波阻）z_0 要低，而且较短接地带的曲线变化较平缓，其情况可见表3-107。另外，测试表明，由于接地体电感的作用，接地体阻抗由初始值逐渐下降，直到8μs左右才趋于稳定值。

基于以上所述情况。因此，在设计中对高土壤电阻率地区，一般均采用多根并联水平伸长接地组合的方式。GB 50065—2011 规定，如土壤电阻率很高，接地电阻很难降低到30Ω时，可采用6～8根总长不超过500m的放射形接地体或连续伸长接地体，其工频接地电阻可不受限制。

表 3-107　不同土壤电阻率情况下各种伸长接地组合的阻抗—时间曲线

土壤电阻率（Ω·m）	组合方式	接地体总长（m）	阻抗（Ω）			波形
			z_0	z_2	z_4	
1200	2×100	200	100	27	19	3.5/30
	2×60∥2×40	200	63	17	14	
	5×40	200	55	15	13	
2000	4×100	400	100	16.5	13	
	2×100∥2×60∥2×40	400	79	13	12	
	4×60∥4×40	400	67	11	10	
5000	100×100	200	100	65	54	
	100∥60∥40	200	92	60	52	
	2×60∥2×40	200	88	57	50	

注　z_2 表示2μs时之阻抗，z_4 表示4μs时之阻抗。2×60∥2×40表示接地体由2根60m与2根40m组合而成。

2. 连续伸长接地体在特高土壤电阻率地区的应用

土壤电阻率很高（如 ρ=8000～10000Ω·m 及以上）时，接地体周围的泄漏电导的作用已变得很小。此时，电容效应及位移电流显著增加，因而波过程就起着重要作用。图3-178示出了 ρ=8000Ω·m、长50m的水平接地体，从塔顶测量得到的冲击阻抗随时间变化的关系曲线。由图可以看出，在 t=0 之后表现出的接地体初始阻抗（即波阻抗）约为250Ω。在 t=0.5μs 时，由于位移电流和传导电流共同作用的结果，使接地体阻抗降为125Ω左右。在此之后，由于从接地体末端（它相当于开路）传来负反射电流波，使冲击阻抗

又急剧上升，最终趋为稳态电阻值。同时，由图可以看出，接地体的波阻小于它的稳态电阻。这时，波过程对接地是有利的。在特高土壤电阻率地区，为了减小冲击接地阻抗，可以利用波过程的这一有利条件，将波过程转变到电阻过程的时间延长，因而可采用连续伸长接地体。这样，连续伸长接地体的长度至少应满足在冲击电流的波头时间范围内无终端反射，其长度应为

$$l \geqslant \frac{\tau_t v}{2} \tag{3-383}$$

式中 l——连续伸长接地体长度，m；

τ_t——波头长度，μs；

v——波速，m/s。

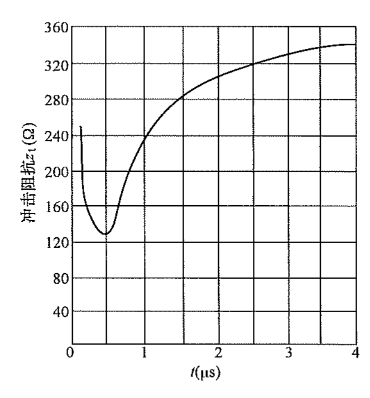


图 3-178 ρ=8000Ω·m 地区水平接地体的冲击阻抗（直角波）

冲击电流在地中接地体里传播的速度可由电磁场和电路的相似性得到，即

$$v = \frac{1}{\sqrt{L'C'}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \tag{3-384}$$

将 ε 及 μ 值代入式（3-384），则得

$$v = \frac{3\times10^8}{\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{3-385}$$

这样，当取 τ_t=6μs、ε_r=4～15 时，连续伸长接地体的长度应为 230～450m。这对 110～500kV 的架空输电线路而言，相当于 1～2 个档距长度。所以，一般连续伸长接地体均沿线路方向埋设并与邻塔接地装置相连，这在一定程度上尚可起到对导线的耦合作用。在工程中使用时，一般均埋设 1～2 条连续伸长接地体。为了降低接地装置的起始冲击阻抗，尚应并联一些短的水平接地带。

3. 引外接地的应用

GB 50065—2011 建议，在高土壤电阻率地区，如在杆塔附近有可以利用的低电阻率的土壤，为了减小冲击接地电阻，可以采用引外接地，即用较长的接地带引至低电阻率的土壤中再作集中接地。但引外接地的距离（即引线的长度）是有一定要求的，它决定于大地的电性参数ρ及ε_r。如当土壤电阻率不很高时，接地带周围的泄漏电导相对较大，如接地带过长，其末端电位已很低，此时，与接地带末端相连的引外接地装置就不能起到降低接地冲击阻抗的作用，因此，接地规程推荐引外接地线的最大长度不宜大于表 3-83 所列数值的 1.5 倍。

曾永林《接地技术》建议，当冲击电流的波头长度为 3～6μs 时，引外线的最大长度 l_{max} 可按下式估计

$$l_{max} = (0.0265 \sim 0.053)\times\rho\sqrt{\varepsilon_r} \tag{3-386}$$

式中 ρ——土壤电阻率，Ω·m；

ε_r——地的相对介电系数，一般地区可取 ε_r=9；

0.0265——用于波头长度 3μs；

0.053——用于波头长度 6μs。

（七）接地装置的防腐

接地装置长期处于地下，在自然条件或工况条件下会与其所处环境的介质发生化学或电化学作用而引起退化和破坏，这极大地影响其使用寿命，造成接地装置的局部断裂，接地线与接地网脱离，形成严重的接地隐患或构成事故。

接地装置的金属腐蚀可以分为湿腐蚀与干腐蚀两种形态，见图 3-179。湿腐蚀就是伴有水分的腐蚀，是因电化学反应进行的，分为电腐蚀与自然腐蚀。干腐蚀是未伴有水分的腐蚀，是由于高湿度的空气或反应性气体所致的化学反应引起的腐蚀。

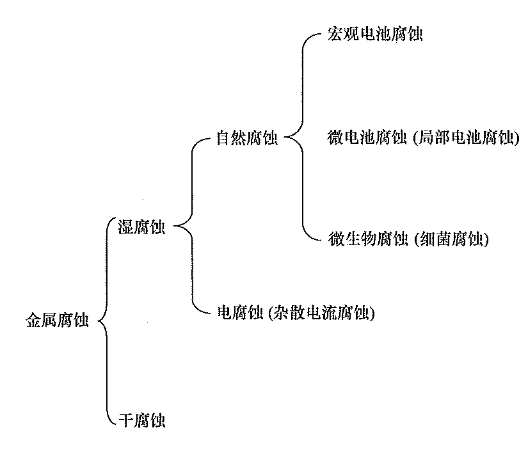


图 3-179 金属腐蚀的形态

土壤腐蚀等级的评分标准推荐采用德国 Baechman 打分法并进行了适当简化。现将其摘录于表 3-108 及表 3-109。在尚未获得更完美的其他土壤腐蚀评价方法时，可以此综合评价法进行土壤腐蚀性评价。建议今后在线路接地装置腐蚀性评价时可采用此法以积累经验。

表 3-108　土壤腐蚀等级的评分标准

a）土壤分析

	项　目	单位	数值	分数	指数
土壤类型	黏土含量	%	<10 10～30 30～50 50～80 >80	4 2 0 −2 −4	Z_1
	泥炭土，沼泽土，黏土，盐泽土，腐蚀土（有机料）	%	>5	−12	
	有无污染物（炭，煤炭，焦炭，炭渣，排污水，熔渣，垃圾，碎石等）		有 无	−12 0	
土壤电阻率		Ω·m	>500 200～500 50～200 20～50 10～20 <10	4 2 0 −2 −4 −6	Z_2
含水量		%	<20 >20	0 −1	Z_3
pH			>9 5.5～9 4～5.5 <4	2 0 −1 −3	Z_4
酸碱度	中和酸的量或碱度	mmol/kg	<200 200～1000 >1000	0 1 3	Z_5
	中和碱的量或酸度	mmol/kg	<2.5 2.5～5 5～10 10～20 20～30 >30	0 −2 −4 −6 −8 −10	
硫化物（S^{2-}）含量		mg/kg	<5 5～10 >10	0 −3 −6	Z_6
中性盐（水溶性）（Cl^-）+2（SO_4^{2-}）含量		mmol/kg	<3 3～10 10～30 30～100 >100	0 −1 −2 −3 −4	Z_7
硫酸盐（SO_4^{2-} 盐酸提取物）含量		mol/kg	<2 2～5 5～10 >10	0 −1 −2 −3	Z_8
b）现场勘测					
埋设处的地下水情况			地下水位以上 地下水位以下 地下水交替处	0 −1 −2	Z_9

根据表 3-108 的打分，按表 3-109 进行土壤腐蚀等级的评定。

表 3-109　土壤腐蚀性评定

总得分 B	土壤腐蚀等级	土壤腐蚀性
$B>0$	I_a	极弱腐蚀
−1～−4	I_b	弱腐蚀
−5～−10	Ⅱ	强腐蚀
$B<-10$	Ⅲ	极强腐蚀
$B=Z_1+Z_2+Z_3+Z_4+Z_5+Z_6+Z_7+Z_8+Z_9$		

杆塔接地装置的防腐，应根据土壤的理化特性及土壤腐蚀程度（等级）的判别来确定。防腐措施一般有耐腐蚀接地材料的采用、阴极保护措施的采用、各种防腐涂料的采用、降阻防腐剂等措施的采用以及施工措施的采用等。

耐蚀接地材料是指在接地装置的寿命期（40 年）内，该种接地材料能耐受住土壤对其产生的腐蚀并能满足其工频及雷电的泄流功能要求。因此，从这个意义上来讲，即使是一般认为最易腐蚀的镀锌钢材来讲，在腐蚀性较轻的中性土壤中，若能满足 40 年寿命期的要求，也可称之为耐蚀接地材料。

对铜覆钢接地材料在腐蚀性地区中的应用特做如下说明。

1. 铜覆钢材料的选用

在强酸性、强碱性及高腐蚀性介质的中性土壤中，均可选用铜覆钢作为杆塔接地装置的接地体。在酸性土壤中，铜覆钢不易出现钝化层，故铜在酸性土壤中的腐蚀程度要大于同等腐蚀条件下的碱性土壤。但即使在较强的酸性土壤中，铜覆钢的腐蚀率仍然是不大的。邵建人在《铜地网对土壤重金属污染的评估与环保对策》中给出了铜及铜覆钢在腐蚀性土壤中的腐蚀率，见表 3-110 及表 3-111。

表 3-110　铜及铜覆钢在酸性土壤中的腐蚀率

土壤特性	透气性好，可溶盐低的酸性土壤	鹰潭南方典型酸性土壤，Ⅱ级强腐蚀（pH：4.9；4.81）	深圳酸性土（pH：6.1）	广州酸性土（pH：6.2）
试验周期	长期	长期（短期）	长期	长期
腐蚀率（mm/a）	0.00254（0.0254）	0.00247（0.023）	0.00686 0.00787	0.0045

注　表中括号外数字为平均值，括号内数字为最大值或短期加速试验值。

表 3-111 铜及铜覆钢在盐碱性土壤中的腐蚀率

土壤特征	美国加利福尼亚海边（盐碱性土壤中）	可溶性盐含量高的碱性土壤	硫酸盐含量高的土壤	福建沿海六个变电站（盐碱性土）	大庆强腐蚀碱性苏达盐土（pH：8.24）	塘沽腐蚀性强的碱性海滨盐渍土（pH：8.29）	良乡较弱腐蚀性碱性黄土（pH：8.56）	新疆库尔勒荒漠盐土含大量细砂颗粒、微生物（pH：9.0）	甘肃玉门荒漠盐土含大量砾石、微生物（pH：9.3）	青海格尔木盐渍土、微生物（pH:8.4）	沈阳中碱性潮土	大港滨海盐土
试验周期	长期	长期	长期	短期	短期	短期	短期	长期	长期	长期	长期	长期
腐蚀率（mm/a）	0.00803	0.01（0.063）	0.0223（0.067）	0.0068（0.0883）	0.017	0.04	0.013	0.00755 点蚀 0.56	0.00205 点蚀 0.13	0.01336 点蚀 0.36	0.00675	0.0039

注 括号外数字为平均值，括号内数字为最大值。点蚀指最大点蚀深度。

2. 铜对土壤金属污染的评估

铜污染主要是妨碍农作物（特别是水稻和麦子）的正常生长发育。如土壤铜污染破坏水稻根系正常代谢功能，导致水稻生长不良而减产。铜被农作物吸收后进入食物链，最终被人吸收。过量的铜与人体内的蛋白质和酶结合，产生不可逆的变性，导致生理代谢过程障碍，或与脱氧核糖核酸相互作用而导致生理突变。人食入过量铜后，可在肝、脑、肾等组织中积累而引发肝铜病、脑铜病和肾铜病等。当接地装置采用铜材时，其对土壤的环境污染问题应予以足够重视。

为避免铜对土壤的污染而造成对生态及对人类健康的危害，建议在农田、耕地以及在水源、鱼池的边缘不采用铜覆钢接地。

（八）接地电阻的测量

测量接地电阻须用专门的仪表。尽管各种仪器的外形和结构有所不同，但其测量原理是一致的。测量方法通用三极法，有被测电极 x、电压极 z、电流极 B，测量时将接地电阻测量器 I1 与 E1 端子接到被测量的对象上，端子 I2 连接到电流极接地棒上，而端子 E2 连接到电压极接地棒上，如图 3-180（a）所示。

测量时按接地电阻测量仪说明书进行布线。在没有说明书时，一般可取电流极距塔脚的距离为接地装置最长射线长度的 4 倍，电压极距塔脚的距离为 2 倍，电流极与电压极间的距离应在 20～40m 间。

（1）辅助接地棒 B 通常都是用直径不小于 0.5cm 的铁棒做成，埋入的深度一般不小于 0.5m。当测量杆塔的接地装置时，通常在接地电阻不大于 10Ω的情况下，辅助接地棒本身的接地电阻不应大于 250Ω，否则就不能满足仪器的灵敏度。

（2）探针 z 通常也都是用直径不小于 0.5cm 的铁棒做成。探针的接地电阻不应大于 1000Ω。超过此值时将影响接地电阻测值的准确度。

对于大多数种类的土壤来说，辅助接地棒的接地电阻一般不会超过 250Ω，必要时可将辅助接地棒周围的土壤弄湿，降低其接地电阻。

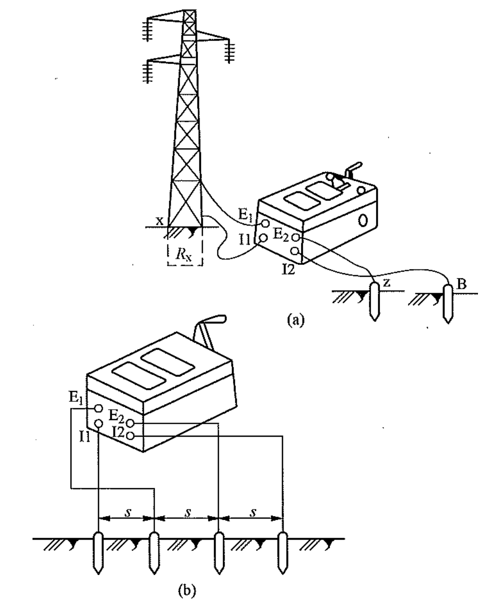


图 3-180 接地电阻测量接线图

（3）测量土壤电阻率时，在被测地区，按照直线埋在土内的四根棒，它们之间的距离为 s，棒的埋入深度不应低于 $\frac{s}{20}$。仪表端子 I1 和 I2 连接到两端的棒上，而端子 E1 和 E2 连接到相应的靠里面的棒上（端子 I1 与 E1 间的连接片是拆开的），如图 3-181（b）所示。

当仪器调节到测量位置时，仪器所指示的是靠里面的两棒之间的电阻。

土壤电阻率的计算公式为

$$\rho = 2\pi sR \times 10^{-2} \tag{3-387}$$

式中 R——接地电阻测量的读数，Ω；

s——棒间距离，cm。

用这种方法可以近似地求得土壤深度等于棒间距离 s 处的平均土壤电阻率。

（4）测量接地电阻注意事项如下：

1）所用连线截面一般不应小于 1～1.5mm²。

2）仪器的电压极引线与电流极引线之间应有足够距离（一般相隔 2m），以免自身发生干扰。

3）使用绝缘电阻表，当发现有干扰时，应注意变换几个转动速度，以便避开外界干扰的影响。

第十节　导地线换位

一、线路换位的作用

线路换位的作用是为了减小电力系统正常运行时电流和电压的不对称，并限制输电线路对通信线路的影响。但是事实上，换位并不能消除线路电流中某些属于零序的高次谐波，而且双线电话可通过其自身的交叉达到对称，故并不很需要电力线路换位。至于单线电报或电话线路，由于电力系统不平衡后产生的地中杂散电流，有可能使这些线路受干扰后电码不清或电话产生杂音，因此在设计中对此问题应有所考虑。一般说只要电力线路与通信线路保持足够的距离，这种影响就很小。根据有关资料，只要二者保持几百米（如 200m 以上），这种影响就不大了。所以目前考虑导线换位问题是为了限制电力系统中的不对称电流和不对称电压，因为不换位线路的每相阻抗和导纳是不相等的，这引起了负序和零序电流。过大的负序电流将会引起系统内电机的过热，而零序电流超过一定数值时，在中性点不接地系统中，有可能引起灵敏度较高的接地继电器的误动作。但考虑这些问题，应从整个电力系统着眼，不能单纯地仅仅考虑某一条输电线路。因为电力系统总是要发展的，如果某一条输电线路引起的不平衡电流或不平衡电压，就已接近电机的允许过热或零序继电器的误差范围，那就势必会给以后的线路设计带来困难。基于这样的观点，在线路设计中完全不考虑换位是不合适的，但换位本身又是整个线路绝缘的薄弱环节，过多的换位也不合适。GB 50545—2010 规定：“中性点直接接地的电力网，长度超过 100km 的线路宜换位。换位循环长度不宜大于 200km。一个变电站某级电压的每回出线虽小于 100km，但其总长超过 200km，可采用换位或变换各回线路的相序排列的措施来平衡不对称电流。中性点非直接接地的电力网，为降低中性点长期运行中的电位，可用换位或变换线路相序排列的方法来平衡不对称电容电流”。GB 50665—2011 对 1000kV 架空输电线路的换位也做出了规定：“单回线路采用水平排列方式时，线路长度大于 120km 应换位；单回路采用三角形排列及同塔双回线路按逆序排列时，其换位长度可适当延长。一个变电站的每回出线小于 120km，但其总长度大于 200km 时，可采用换位或变换各回输电线路相序排列的措施。”GB/T 15543—2008《电能质量　三相电压不平衡度》规定：“电力系统公共连接点电压不平衡度限值，电网正常运行时，负序电压不平衡度不超过 2%，短时不得超过 4%。”

二、换位方式

1. 换位循环典型图

图 3-181 表示了全线路采取一个和两个整循环换位的布置情况。图（a）为换位一个整循环，或称一个全换位，达到首端和末端相序一致。图（b）为两个全换位，达到首端末端相序一致（图中 l 为线路长度）。

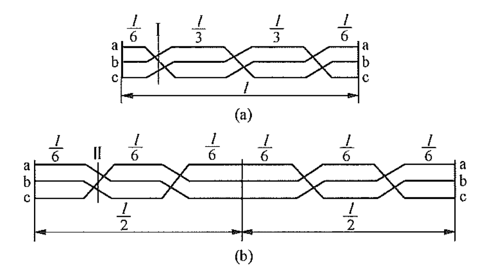


图 3-181　输电线路换位循环布置图

（a）一个全换位；（b）两个全换位

2. 直线杆换位（又称滚式换位）

利用三角排列的直线杆（塔）换位如图 3-182 所示。该图为图 3-181（a）Ⅰ处的透视情况。一般适宜用在冰厚不超过 10mm 的冰区（包括冰厚等于 10mm 的地区）。在重冰区，由于直线换位时导线在换位处有交叉现象，易于在交叉点因覆冰不平衡造成短路，因而宜改用其他换位方法。

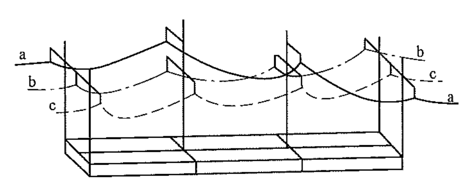


图 3-182　直线杆塔换位

直线杆换位，在换位处导线因改变了排列方式，将使换位杆的绝缘子串产生偏移，为减小此种影响，在设计中往往采用换位杆中心偏离线路中心线的措施（即位移）。位移方向和位移值见第十四章。

3. 耐张塔换位

利用一个特殊的耐张塔来完成换位，如图 3-183 所示，该图为图 3-181（b）Ⅱ处的透视。这种换位方式也适宜在重冰区的线路上使用。

4. 悬空换位

悬空换位法不需要设计特殊的换位杆塔，如图 3-184 所示，即在每相导线上另外再单独串接一组绝缘子串，并通过两根短跳线和一根长跳线直接进行交叉跳接来完成。

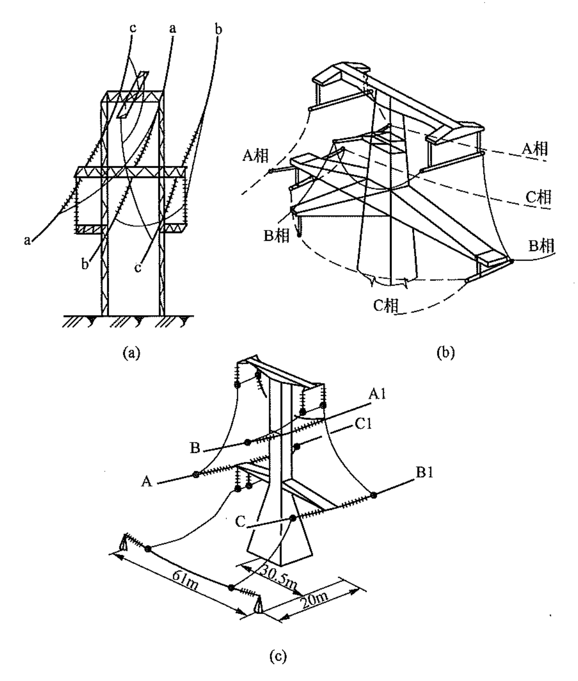


图 3-183 耐张换位

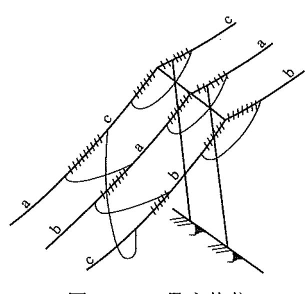


图 3-184 悬空换位

这种换位方法在我国辽宁地区的 154kV 升压为 220kV 的线路以及山西省的一些 110kV 线路上采用过；在国外，欧洲一些国家也曾采用。设计中的关键在于合理选择好该单独串接绝缘子串的绝缘强度，因为它承受的是线路的线电压，根据运行经验应为一般相对地绝缘的 1.3～1.5 倍。

5. 双回路换位

双回路换位有两种方式：一是将两个回路利用耐张塔分成两个单回路，按上述单回路耐张的方式换位。二是采用双回路耐张塔的换位，见图 3-185。这种方式常用于 220～500kV 双回路换位。

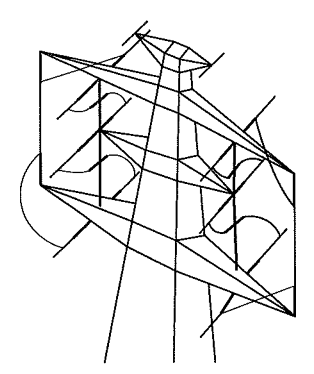


图 3-185 双回路耐张换位

6. 单柱组合耐张塔换位

图 3-186 所示为采用单柱式换位方式进行 1000kV 交流特高压线同塔双回线路的换位。

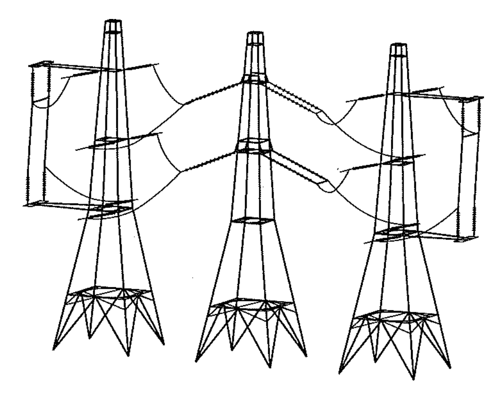


图 3-186 单柱式换位

三、地线换位的作用

由于导线的电磁耦合作用、线路的不完全平衡换位和三相负荷的不对称性，两根架空地线之间或地线与大地之间会形成感应电流回路，从而在地线上产生电能损耗。造成架空地线电能损耗的根本原因在于地线中存在的感应电动势，同时存在电流回路，使地线之间以及地线和大地之间都有电流流过。因此，减小电能损耗可以从两方面来考虑：一是减小地线上的感应电动势；二是减小地线上流过的互感电流。减小地线上流过的互感电流可通过地线分段绝缘单点接地实现，减小地线上的感应电压可通过地线换位实现。

如图 3-187 所示，在相导线不换位的地方，应该在同一地线的两个接地点之间的中心位置进行换位，而线路换位次数的增加必然导致换位杆塔的增加，从而造成基建成本的增加，因此，在采用地线换位法的同时也要考虑到系统的综合经济成本。

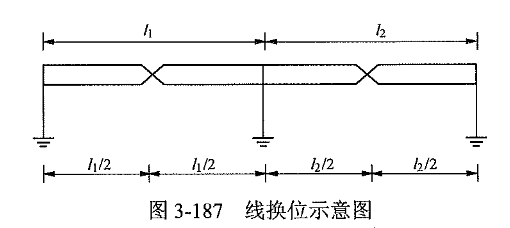


图 3-187 线换位示意图

四、线路不平衡度

(一) 电压、电流不平衡度

在 GB/T 15543—2008《电能质量 三相电压不平衡度》中不平衡指“标称频率为 50Hz 的交流电力系统正常运行方式下由于负序基波分量引起的公共连接点的电压不平衡及低压系统由于零序基波分量而引起的公共连接点的电压不平衡”。不平衡度指“三相电力

系统中三相不平衡的程度。用电压、电流负序基波分量或零序基波分量与正序基波分量的均方根值百分比表示。电压、电流的负序不平衡度和零序不平衡度分别用 ε_{U2}、ε_{U0} 和 ε_{I2}、ε_{I0} 表示”。式（3-388）为不平衡度的表达式。

$$\begin{cases}\varepsilon_{U2}=\dfrac{U_2}{U_1}\times100\% \\ \varepsilon_{U0}=\dfrac{U_0}{U_1}\times100\%\end{cases} \tag{3-388}$$

式中 U_1——三相电压的正序分量均方根值，V；

U_2——三相电压的负序分量均方根值，V；

U_0——三相电压的零序分量均方根值，V。

将式（3-388）中 U_1、U_2、U_0 换为 I_1、I_2、I_0。则为相应的电流不平衡度 ε_{I2} 和 ε_{I0} 的表达式。

在三相系统中，通过测量或仿真计算获得三相电量的幅值和相位后形成三相电压电流的相量形式，再利用相序变换矩阵求解正、负序分量，对于电压有

$$\begin{bmatrix}\dot U_1\\ \dot U_2\\ \dot U_0\end{bmatrix}=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}1 & a & a^2\\ 1 & a^2 & a\\ 1 & 1 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot U_a\\ \dot U_b\\ \dot U_c\end{bmatrix} \tag{3-389}$$

式中：$a=e^{i120^\circ}$ 。

由式（3-388）求出不平衡度。

在没有零序分量的三相系统中，当已知电压或电流三相量 a、b、c 时也可以用式（3-390）求负序不平衡度。

$$\varepsilon_2=\sqrt{\frac{1-\sqrt{3-6L}}{1+\sqrt{3-6L}}}\times100\% \tag{3-390}$$

$$L=(a^4+b^4+c^4)/(a^2+b^2+c^2)^2 \tag{3-391}$$

（二）线路参数不平衡度

线路参数的不平衡度可分为电磁不平衡度和静电不平衡度，分别描述线路阻抗和电容参数的不平衡程度。

在线路的首端施加正序电压，末端三相对地短路，忽略线路电容电流的影响。线路的正、负、零序电压降方程为

$$[I_{120}]=[Y_{120}][U_{120}] \tag{3-392}$$

电磁不平衡度：

$$M_{t0}=\frac{I_0}{I_1}=\frac{Y_{31}}{Y_{11}} \tag{3-393}$$

$$M_{t2}=\frac{I_2}{I_1}=\frac{Y_{21}}{Y_{11}} \tag{3-394}$$

式中：Y_{ij} 下脚标表示元素所在矩阵［由式（3-392）定义］中的位置。

在线路的首端施加正序电压，末端三相对地开路，忽略线路电压降的影响。线路的正、负、零序容性电流方程为

$$[I_{120}]=j\omega[C_{120}]\cdot[U_{120}] \tag{3-395}$$

静电不平衡度

$$D_{t0}=\frac{I_0}{I_1}=\frac{C_{31}}{C_{11}} \tag{3-396}$$

$$D_{t2}=\frac{I_2}{I_1}=\frac{C_{21}}{C_{11}} \tag{3-397}$$

式中：C_{ij} 下脚标表示元素所在矩阵［由式（3-395）定义］中的位置。

双回线路的电磁不平衡度还可分为两类：直通型电磁不平衡度和环流型电磁不平衡度。

直通型电磁不平衡度为

$$M_{t0}=\frac{I_{10}+I_{20}}{I_{11}+I_{21}}=\frac{Y_{31}+Y_{34}+Y_{61}+Y_{64}}{Y_{11}+Y_{14}+Y_{41}+Y_{44}} \tag{3-398}$$

$$M_{t2}=\frac{I_{12}+I_{22}}{I_{11}+I_{21}}=\frac{Y_{21}+Y_{24}+Y_{51}+Y_{54}}{Y_{11}+Y_{14}+Y_{41}+Y_{44}} \tag{3-399}$$

环流型电磁不平衡度为

$$M_{c0}=\frac{I_{10}-I_{20}}{I_{11}+I_{21}}=\frac{Y_{31}+Y_{34}-Y_{61}-Y_{64}}{Y_{11}+Y_{14}+Y_{41}+Y_{44}} \tag{3-400}$$

$$M_{c2}=\frac{I_{12}-I_{22}}{I_{11}+I_{21}}=\frac{Y_{21}+Y_{24}-Y_{51}-Y_{54}}{Y_{11}+Y_{14}+Y_{41}+Y_{44}} \tag{3-401}$$

直通型静电不平衡度为

$$D_{t0}=\frac{I_{10}+I_{20}}{I_{11}+I_{21}}=\frac{C_{31}+C_{34}+C_{61}+C_{64}}{C_{11}+C_{14}+C_{41}+C_{44}} \tag{3-402}$$

$$D_{t2}=\frac{I_{12}+I_{22}}{I_{11}+I_{21}}=\frac{C_{21}+C_{24}+C_{51}+C_{54}}{C_{11}+C_{14}+C_{41}+C_{44}} \tag{3-403}$$

环流型静电不平衡度为

$$D_{c0}=\frac{I_{10}-I_{20}}{I_{11}+I_{21}}=\frac{C_{31}+C_{34}-C_{61}-C_{64}}{C_{11}+C_{14}+C_{41}+C_{44}} \tag{3-404}$$

$$D_{c2}=\frac{I_{12}-I_{22}}{I_{11}+I_{21}}=\frac{C_{21}+C_{24}-C_{51}-C_{54}}{C_{11}+C_{14}+C_{41}+C_{44}} \tag{3-405}$$

式（3-398）～式（3-405）中 I_{ij}、C_{ij}、Y_{ij}，下脚标表示元素所在矩阵［分别由式（3-392）、式（3-395）定义］中的位置。

由式（3-398）～式（3-401）和式（3-402）～式（3-405）可知，线路参数的不平衡度取决于线路的序参数，而线路的序参数又由导线的自身属性、分裂根数、导线间距及相位排列决定。

五、线路电压不平衡度的计算方法

1. 计算机仿真计算

目前常用的计算机电力系统仿真软件均可进行线路电压不平衡度仿真计算，如 ATP-EMTP、EMTPE、MATLAB 等。

分析线路参数对不平衡度的影响，负载用三相对称负载代替，根据线路的输送功率和功率因数，可计算额定输送容量和极限输送容量下变压器线路侧等效阻抗的大小。

$$Z=\frac{U^2}{P/\cos\varphi}\times(\cos\varphi\pm \mathrm{j}\sin\varphi) \quad (3\text{-}406)$$

式中 Z ——变压器线路侧等效阻抗，Ω；

U ——线电压，V；

P ——输送容量，W；

$\cos\varphi$ ——功率因数，一般可取 0.95。

在仿真软件中用三相对称电压源、三相对称负载、多段 π 型等值电路来模拟架空线，通过仿真计算得到其负载端的三相电压电流波形，对数据提取正序及负序分量。形成三相电压电流的相量形式，再利用相一序变换矩阵式（3-389）求解正、负序分量，通过式（3-388）得出电压不平衡度。

2. 近似计算

（1）正序电流

$$I_1=\frac{P}{\sqrt{3}U\cos\varphi} \quad (3\text{-}407)$$

式中 I_1 ——正序电流，A。

（2）相阻抗参数。

根据第一节，计算出相阻抗参数。对单回路双地线一根为常规地线、一根为 OPGW 系统有

$$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{abc}}=\begin{bmatrix} Z_{\mathrm{aa}} & Z_{\mathrm{ab}} & Z_{\mathrm{ac}} & Z_{\mathrm{ao}} & Z_{\mathrm{ag}} \\ Z_{\mathrm{ba}} & Z_{\mathrm{bb}} & Z_{\mathrm{bc}} & Z_{\mathrm{bo}} & Z_{\mathrm{bg}} \\ Z_{\mathrm{ca}} & Z_{\mathrm{cb}} & Z_{\mathrm{cc}} & Z_{\mathrm{co}} & Z_{\mathrm{cg}} \\ Z_{\mathrm{oa}} & Z_{\mathrm{ob}} & Z_{\mathrm{oc}} & Z_{\mathrm{oo}} & Z_{\mathrm{og}} \\ Z_{\mathrm{ga}} & Z_{\mathrm{gb}} & Z_{\mathrm{gc}} & Z_{\mathrm{go}} & Z_{\mathrm{gg}} \end{bmatrix} \quad (3\text{-}408)$$

式中 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{abc}}$ ——线路相阻抗矩阵，Ω；

Z_{ik} ——传输线的相自阻抗和互阻抗，Ω，i,k=a、b、c、o、g，下标 a、b、c 表示相导线，o、g 表示地线，当 $i=k$ 时表示自阻抗，当 $i\neq k$ 时表示互阻抗。

（3）线路电压降

$$\Delta U_{\mathrm{abc}}=Z_{\mathrm{abc}}I_{\mathrm{abc}} \quad (3\text{-}409)$$

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{abc}}=\begin{bmatrix} I_{\mathrm{a}} & I_{\mathrm{b}} & I_{\mathrm{c}} & I_{\mathrm{o}} & I_{\mathrm{g}} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \quad (3\text{-}410)$$

式中 $\boldsymbol{I}_{\mathrm{abc}}$ ——线路相电流矩阵，A。

当地线直接接地如 OPGW 则有 ΔU_{o}=0 的约束边界条件，当地线分段绝缘单点接地则有 I_{g}=0 的约束边界条件。

（4）线路电压不平衡度

线路末端的节点电压 U_{abc} 为

$$U_{\mathrm{abc}}=U-\Delta U_{\mathrm{abc}} \quad (3\text{-}411)$$

对 U_{abc} 用式（3-389）进行相序变换后可得节点序电压 U_{120}。然后依照式（3-388）求得线路电压不平衡度。

【例 3-10】 220kV 输电线路，双地线对称布置，塔头尺寸及平均对地高度如图 3-188 所示，导线标号 JL/G1A-400/35，线路亘长 110km，考虑不换位，线路输送容量 150000kW，功率因数 0.95，大地电阻率 ρ=200Ω·m，各线间距离：d_{ac}=14.0m；d_{xy}=11.0m，$d_{\mathrm{ab}}=d_{\mathrm{bc}}$=7m。导线半径 r=13.6mm；地线电阻 R_{g}=1.7Ω/km；地线半径 r=5.5mm；导线电阻 R=0.08Ω/km。假设一根地线直接接地，另一根地线单点接地分段绝缘。求其在运行中的不平衡程度。

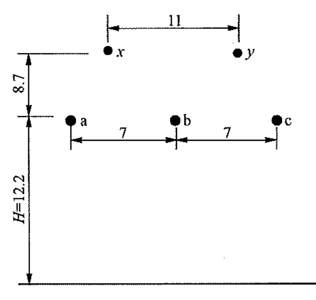


图 3-188 塔头布置图

解 1. 相阻抗参数矩阵

等值深度 $D=660\sqrt{\frac{\rho}{f}}=660\sqrt{\frac{200}{50}}=1320$ （m）

导地线自阻抗

$$Z_{\mathrm{aa}}=Z_{\mathrm{bb}}=Z_{\mathrm{cc}}=R+0.05+\mathrm{j}0.1445\lg\left(\frac{D}{Re}\right)$$

$$=0.08+0.05+\mathrm{j}0.1445\lg\left(\frac{1320}{0.81\times13.6\times10^{-3}}\right)$$

$$=0.13+\mathrm{j}0.734\ (\Omega/\mathrm{km})$$

$$Z_{\mathrm{oo}}=Z_{\mathrm{gg}}=R_{\mathrm{g}}+0.05+\mathrm{j}0.1445\lg\left(\frac{D}{Re}\right)$$

$$=1.7+0.05+\mathrm{j}0.1445\lg\left(\frac{1320}{0.726\times5.5\times10^{-3}}\right)$$

$$=1.75+\mathrm{j}0.798\ (\Omega/\mathrm{km})$$

导地线互阻抗

$$Z_{\mathrm{ab}}=Z_{\mathrm{cb}}=0.05+\mathrm{j}0.1445\lg\left(\frac{D}{d_{\mathrm{ab}}}\right)$$

$$=0.05+\mathrm{j}0.1445\lg\left(\frac{1320}{7}\right)=0.05+\mathrm{j}0.329\ (\Omega/\mathrm{km})$$

$$Z_{\mathrm{ac}}=0.05+\mathrm{j}0.1445\lg\left(\frac{D}{d_{\mathrm{ac}}}\right)$$

$$=0.05+\mathrm{j}0.1445\lg\left(\frac{1320}{14}\right)=0.05+\mathrm{j}0.285\ (\Omega/\mathrm{km})$$

$$Z_{ao}=Z_{cg}=0.05+j0.1445\lg\left(\frac{D}{d_{ao}}\right)$$
$$=0.05+j0.1445\lg\left[\frac{1320}{\sqrt{8.7^2+(7-5.5)^2}}\right]$$
$$=0.05+j0.314\ (\Omega/km)$$

$$Z_{ag}=Z_{co}=0.05+0.1445\lg\left(\frac{D}{d_{ag}}\right)$$
$$=0.05+j0.1445\lg\left(\frac{1320}{\sqrt{8.7^2+(7+5.5)^2}}\right)$$
$$=0.05+j0.280\ (\Omega/km)$$

$$Z_{bo}=Z_{bg}=0.05+j0.1445\lg\left(\frac{D}{d_{bo}}\right)$$
$$=0.05+j0.1445\lg\left(\frac{1320}{\sqrt{8.7^2+5.5^2}}\right)$$
$$=0.05+j0.305\ (\Omega/km)$$

$$Z_{og}=0.05+j0.1445\lg\left(\frac{D}{d_{og}}\right)$$
$$=0.05+j0.1445\lg\left(\frac{1320}{11}\right)=0.05+j0.300\ \ (\Omega/km)$$

相阻抗参数矩阵

$$\boldsymbol{Z}=\begin{bmatrix}0.13+j0.734 & 0.05+j0.329 & 0.05+j0.285 & 0.05+j0.314 & 0.05+j0.280\\0.05+j0.329 & 0.13+j0.734 & 0.05+j0.329 & 0.05+j0.305 & 0.05+j0.305\\0.05+j0.285 & 0.05+j0.329 & 0.13+j0.734 & 0.05+j0.280 & 0.05+j0.314\\0.05+j0.314 & 0.05+j0.305 & 0.05+j0.280 & 1.75+j0.798 & 0.05+j0.300\\0.05+j0.280 & 0.05+j0.305 & 0.05+j0.314 & 0.05+j0.300 & 1.75+j0.798\end{bmatrix}\ (\Omega/km)$$

$$Z_{abc}=\boldsymbol{Z}\cdot l=\begin{bmatrix}14.3+j80.724 & 5.5+j36.169 & 5.5+j31.384 & 5.5+j34.567 & 5.5+j30.803\\5.5+j36.169 & 14.3+j80.724 & 5.5+j36.169 & 5.5+j33.507 & 5.5+j33.507\\5.5+j31.384 & 5.5+j36.169 & 14.3+j80.724 & 5.5+j30.803 & 5.5+j34.567\\5.5+j34.567 & 5.5+j33.507 & 5.5+j30.803 & 192.5+j87.729 & 5.5+j40.525\\5.5+j30.803 & 5.5+j33.507 & 5.5+j34.567 & 5.5+j40.525 & 192.5+j87.729\end{bmatrix}\ (\Omega)$$

2. 负荷电流

$$I_a=\frac{P/\cos(\phi)}{\sqrt{3}U}=\frac{150000}{\sqrt{3}\times220\times0.95}=414.366\ \ (A)$$

3. 线路电压降方程组

$$\Delta U_{abc}=Z_{abc}I_{abc}$$

$$\begin{bmatrix}\Delta U_a\\\Delta U_b\\\Delta U_c\\0\\\Delta U_g\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}14.3+j80.724 & 5.5+j36.169 & 5.5+j31.384 & 5.5+j34.567 & 5.5+j30.803\\5.5+j36.169 & 14.3+j80.724 & 5.5+j36.169 & 5.5+j33.507 & 5.5+j33.507\\5.5+j31.384 & 5.5+j36.169 & 14.3+j80.724 & 5.5+j30.803 & 5.5+j34.567\\5.5+j34.567 & 5.5+j33.507 & 5.5+j30.803 & 192.5+j87.729 & 5.5+j40.525\\5.5+j30.803 & 5.5+j33.507 & 5.5+j34.567 & 5.5+j40.525 & 192.5+j87.729\end{bmatrix}\bullet\begin{bmatrix}414.366\\414.366e^{j-120^\circ}\\414.366e^{j-240^\circ}\\I_o\\0\end{bmatrix}$$

求解此线性方程组：

$$\begin{bmatrix}\Delta U_a\\\Delta U_b\\\Delta U_b\\I_o\\\Delta U_g\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}5413+j19228\\14211-j12607\\-17771-j8258\\-6.134-j2.296\\-334.7-j1556\end{bmatrix}$$

4. 线路末端的节点电压

$$U_{abc}=U-\Delta U_{abc}$$

$$\begin{bmatrix}U_a\\U_b\\U_c\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dfrac{220\times10^3}{\sqrt{3}}\\\dfrac{220\times10^3}{\sqrt{3}}e^{j-120^\circ}\\\dfrac{220\times10^3}{\sqrt{3}}e^{j-240^\circ}\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}5413+j19228\\14211-j12607\\-17771-j8258\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1.216\times10^5-j1.923\times10^4\\-7.772\times10^4-j9.739\times10^4\\-4.574\times10^4+j1.183\times10^5\end{bmatrix}\ (V)$$

5. 正负零序变换

$$\begin{bmatrix}\dot{U}_1\\\dot{U}_2\\\dot{U}_0\end{bmatrix}=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}1 & a & a^2\\1 & a^2 & a\\1 & 1 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{U}_a\\\dot{U}_b\\\dot{U}_c\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}\dot{U}_1\\\dot{U}_2\\\dot{U}_0\end{bmatrix}=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}1 & e^{j120^\circ} & e^{j240^\circ}\\1 & e^{j240^\circ} & e^{j120^\circ}\\1 & 1 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1.216\times10^5-j1.923\times10^4\\-7.772\times10^4-j9.739\times10^4\\-4.574\times10^4+j1.183\times10^5\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1.234\times10^5-j1.912\times10^4\\-1.142\times10^3-j654.425\\-617.667+j545.667\end{bmatrix}$$

6. 电压不平衡度

$$\varepsilon_{U2}=\frac{U_2}{U_1}\times100\%=\frac{\left|-1.142\times10^3-j654.425\right|}{\left|1.234\times10^5-j1.912\times10^4\right|}\times100\%=1.1\%$$

$$\varepsilon_{U0}=\frac{U_0}{U_1}\times100\%=\frac{\left|-617.667+j545.667\right|}{\left|1.234\times10^5-j1.912\times10^4\right|}\times100\%=0.66\%$$

第十一节 地 线

一、地线的作用

输电线路的地线除用作防雷外，还有多方面的综合作用，如实现载波或光纤（OPGW）通信；降低不对称短路时的工频过电压、减小潜供电流；作为屏蔽线以降低电力线对通信线的干扰等。

减小潜供电流、降低工频过电压和降低电力线对通信线的危险及干扰影响都与地线中零序电流（零序阻抗）大小有关，因而与地线所选用的材料有关。一般需选用零序阻抗较小的良导体。即使用作载波通信，特别当距离较长时，地线外层也需用高导电性材料，而当地线仅用作防雷时，选用钢线即可。因此，根据地线之不同作用，地线材料选择亦应有所不同。目前地线采用的材料一般有镀锌钢绞线、钢芯铝线、钢芯铝合金线、铝包钢线等。

按照用途之不同，地线悬挂方式有两种，一种是直接悬挂于杆塔上，另一种是经过绝缘子与杆塔相连，使地线对地绝缘。

由于地线至各相导线的距离一般是不相等的，它们之间的互感就有些差别。因此，尽管在正常情况下三相导线上的负荷电流是平衡的，但在地线上仍然要感应出一个纵电动势。如果地线逐塔接地，这个电动势就要产生电流，其结果就增加了线路的电能损失。这个附加的电能损失是同负荷电流的二次方和线路长度成比例。对于220kV长200～300km的输电线路，这个附加电能损失每年约可达几十万千瓦时，而对于500kV长300～400km的线路，每年约可损失数百万千瓦时。因此，目前我国设计的超高压线路、特高压线路，即使不做其他用途，也往往将地线绝缘以减少电能损失。

地线虽然绝缘，但在雷击时，地线的绝缘在雷电先驱放电阶段即被击穿而使地线呈接地状态，因而不会影响其防雷效果。

二、电磁感应和电能损失的计算

电磁感应电压的大小取决于负荷电流、线路长度和导地线布置方式，而与输电电压无关。所以，电压等级相同的不同线路，其电磁感应电压也可能相差甚远；即使同一线路，也会随着系统运行方式变更而变化较大。

电磁感应电压、电流的计算建立在导地线全阻抗的基础上。以单回路为例，设$[\boldsymbol{U}]$为电压矩阵，$[\boldsymbol{I}]$为导线负荷电流及地线感应电流矩阵，$[\boldsymbol{Z}]$为导地线全阻抗矩阵，则有电磁感应矩阵方程如下：

$$\begin{bmatrix}U_1\\U_2\\U_a\\U_b\\U_c\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Z_{1,1}Z_{1,2}Z_{1,a}Z_{1,b}Z_{1,c}\\Z_{2,1}Z_{2,2}Z_{2,a}Z_{2,b}Z_{2,c}\\Z_{a,1}Z_{a,2}Z_{a,a}Z_{a,b}Z_{a,c}\\Z_{b,1}Z_{b,2}Z_{b,a}Z_{b,b}Z_{b,c}\\Z_{c,1}Z_{c,2}Z_{c,a}Z_{c,b}Z_{c,c}\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}I_1\\I_2\\I_a\\I_b\\I_c\end{bmatrix}\tag{3-412}$$

1、2为两根地线，计算时，可分别令$I_1=I_2=0$，或$U_1=U_2=0$，而转求U_1、U_2或I_1、I_2。

（一）电磁感应电动势公式计算法

根据互阻抗的式（3-3）可算出地线1和2上每千米的电磁感应电动势E_1和E_2。

在正常情况下，a、b、c三相电流平衡，即

$$I_a=\alpha^2 I_b=\alpha I_c,\quad \alpha=\angle 120^\circ \tag{3-413}$$

（相序排列取常用的正序或负序，其结果相同，此处为任意取的负序）

故对单回路的线路

$$E_1 = j0.145I_a\left(\alpha\lg\frac{d_{1a}}{d_{1b}} + \alpha^2\lg\frac{d_{1a}}{d_{1c}}\right) \quad (3\text{-}414)$$

而且在通常对称布置的情况下（$d_{1a}=d_{2c}$，$d_{1b}=d_{2b}$，$d_{1c}=d_{2a}$）有

$$E_2 = j0.145I_a\left(\alpha\lg\frac{d_{1c}}{d_{1b}} + \alpha^2\lg\frac{d_{1c}}{d_{1a}}\right) \quad (3\text{-}415)$$

式中 d_{1a}——地线1和导线a之间的距离，其余类推。

（二）电磁感应电流

若绝缘地线两端经排流线圈接地，则在上述纵电动势的作用下就会产生电流，如在正常情况下对于地线1的电流为

$$I_1 = \frac{Z_\Sigma E_1 - Z_m E_2}{Z_\Sigma^2 - Z_m^2} \times K \quad (3\text{-}416)$$

$$Z_\Sigma = Z_{11} + Z_t/L \quad (3\text{-}417)$$

式中 Z_t——两端排流线圈之工频阻抗；

Z_{11}——地线以大地为回路的自阻抗，见式（3-2）；

Z_m——两地线间或地线与导线间的互阻抗；

L——线路总长。

纵电动势 E_1 和 E_2 由式（3-415）和式（3-416）给出；至于系数 K，当导线不换位时 K=1，而当导线换位时，$K=(l_a+l_b\angle 120^\circ+l_c\angle 240^\circ)/L$，$l_a$、$l_b$ 和 l_c 为导线a依次占据a、b、c位置的累计长度。又若地线也换位，则上式中的 E_1 和 E_2 都应代之以它们的纵分量 $E_L=\frac{1}{2}(E_1+E_2)$。

这个电流再叠加上后面将要提到的静感应电流就是实际通过排流线圈的电流，当然不应超过排流线圈的额定值。

在导线不换位的情况下，这个电磁感应电流可以达到接近10A的水平（对于220km线路），它通过地线入地就增加了电能损失，因此当绝缘地线用作高频通道时，因一般在两端要装排流线圈，故导线还是换位为好。

（三）电能损失

1. 两根地线逐塔接地

在正常情况下，由于两地线的电磁感应电动势不等，而它们在塔上又是互相联通的，所以在它们之间会出现环流。另外当然还会有以大地为回路的电流。根据对称分量的基本概念可知，这两个分量可以分开计算，并将各分量所产生之电能损失相加，即得到总的电能损失。

（1）线间的环流分量。此即所谓金属回路分量

$$\left.\begin{aligned} E_M &= (E_1 - E_2)/2 \\ Z_M &= Z_{11} - Z_m \\ I_M &= E_M / Z_M \end{aligned}\right\} \quad (3\text{-}418)$$

每千米的功率损失（包括两地线）为

$$\Delta P_M = 2|I_M^2|\mathrm{Re}(Z_M) = 2|I_M^2|R_i \quad (3\text{-}419)$$

式中 R_i——地线每千米的电阻，Ω。

从而年电能损失

$$\Delta W_M = \Delta P_M L\tau = 2|I_M^2|R_i L\tau \quad (3\text{-}420)$$

式中 L——线路总长，km；

τ——损失小时数。

（2）地中分量。此即所谓纵分量，类似三相系统的零序分量

$$\left.\begin{aligned} E_L &= (E_1 + E_2)/2 \\ Z_L &= Z_{11} + Z_m \\ I_L &= E_L / Z_L \end{aligned}\right\} \quad (3\text{-}421)$$

每千米的功率损失（包括两地线）为

$$\Delta P_L = 2|I_L^2|\mathrm{Re}(Z_L) \quad (3\text{-}422)$$

而年电能损失为

$$\Delta W_L = \Delta P_L L\tau = 2|I_L^2|(R_i + 0.10)L\tau \quad (3\text{-}423)$$

将有关数据代入式（3-424）即得到单回线年电能损失。

（3）总电能损失为

$$\Delta W = \Delta W_M + \Delta W_L \quad (3\text{-}424)$$

2. 一根地线接地

$$\Delta P = |(E_1/Z_{11})^2|\mathrm{Re}(Z_{11}) \quad (3\text{-}425)$$

而年电能损失为

$$\Delta W = \Delta P L\tau \quad (3\text{-}426)$$

三、静电感应的计算

静电感应主要是由于导线和地线之间的耦合电容引起的。静电感应电压的大小，与线路电压等级及导线的布置密切相关，与线路长度及负荷电流的大小基本无关。当地线一点接地或经排流线圈接地时，地线上静电感应电压接近于零。

静电感应电压、电流的计算方法建立在麦克斯韦方程的基础上。

根据麦克斯韦方程，平行多导体系统的电位和电荷关系 $[\phi]=[P]\cdot[q]$。具体到双地线的单回线路，则为

$$\begin{bmatrix}\phi_1\\\phi_2\\\phi_a\\\phi_b\\\phi_c\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{1,1}P_{1,2}P_{1,a}P_{1,b}P_{1,c} \\ P_{2,1}P_{2,2}P_{2,a}P_{2,b}P_{2,c} \\ P_{a,1}P_{a,2}P_{a,a}P_{a,b}P_{a,c} \\ P_{b,1}P_{b,2}P_{b,a}P_{b,b}P_{b,c} \\ P_{c,1}P_{c,2}P_{c,a}P_{c,b}P_{c,c} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix}q_1\\q_2\\q_a\\q_b\\q_c\end{bmatrix} \quad (3\text{-}427)$$

式中 $[\phi]$——导地线对地电位；

$[P]$——电位系数；

[q]——导地线上的电荷。

计算时，可令 $q_1=q_2=0$ 转求 ϕ_1、ϕ_2；或令 $\phi_1=\phi_2=0$ 而转求 q_1、q_2，进而导出 i_1、i_2。而电位系数 P 的计算见式（3-10）、式（3-11）。若地线接地，则在求出地线的电荷以后，即可进一步算出从该地线流入大地的电流。如地线 1 接地，则 $I_1=\mathrm{d}q_1/\mathrm{d}t=\mathrm{j}\omega q_1$，即为自地线 1 流入大地的静感应电流（A/km）。

四、地线的绝缘

1. 地线的绝缘水平

在确定地线的绝缘水平时需要考虑到：在线路正常运行情况下能有良好的绝缘性能，而在雷电先驱放电阶段的强烈电场作用下，能使原来绝缘的地线呈完全接地状态，以及满足线路事故情况下的特殊要求等。

正常情况下的感应电压与线路是否换位和是否采用排流线圈有密切关系。若线路换位对称，则正常情况下的静感应电压可以基本上得到消除。根据东北某 220kV 线路的实测结果，换位后残存的感应电压只有数百伏的水平。即使线路不换位，地线上的静感应电压也可通过排流线圈而得到消除。仅当线路不换位而且又不能安装排流线圈，也就是仅当利用绝缘地线抽能的情况下，静感应电压才可能达到较高的水平，如对 220kV 线路可达 10kV 或略多一点。正常情况下电磁感应纵电动势也要使绝缘地线出现一个对地电压。对于一般的 220kV 线路，其对电动势每千米约有十几伏，500kV 线路每千米约 50～60V。导线正常换位的线路，若每一换位节距不超过 30～50km，则对 220kV 线路来讲，其对地电压约有几百伏，而 500kV 线路约有 1500～3000V 左右。因此，一般说来，除非想利用绝缘地线抽能或输电，否则对于 220kV 线路，只要地线的绝缘能有 2～3kV 以上的耐压水平，500kV 线路能有 5～8kV 左右的耐压水平就可认为足够。

当采用双地线时，为了降低地线上的电磁感应纵电动势，在导线的每个换位节距内应将地线换位。地线换位应尽可能做到对称，即在一个导线换位节距内地线在线路中心线左侧和右侧的位置尽可能相等，这样才能大大降低地线上的感应电动势。地线换位次数愈多，感应电压愈小。为了方便起见，地线换位一般在耐张塔上进行，如图 3-189 所示。但这样就难以使地线换位对称。不过，略有不对称时，地线上的感应电压不会很高。

从防雷角度看，当雷电先驱逐步向线路逼近时，最后究竟是导向避雷线还是导向导线，也就是是否会绕过地线而击中导线，主要取决于“先驱—地线—导线”这一系统的电场图形。若绝缘地线很长（如数十千米的线路沿全线绝缘），则在先驱逐步发展的过程中不可能在绝缘地线上感应出明显的对地电位，故而上述的电场图形应与地线接地时基本相同。若绝缘地线很短（如只在全线中绝缘一小段供抽能用），则可通过限制地线绝缘水平的办法，保证在雷电先驱最后定向以前，先驱在地线上所感应出的电压即足以使绝缘闪络，从而及时转化为接地状态，这样也就可以保证先驱的正确定向，也就是保证了绝缘地线的正常防雷功能。从这一角度出发，绝缘地线的绝缘水平一般不宜超过 40～50mm 空气间隙的绝缘水平。绝缘地线的放电间隙，其间隙应根据地线上感应电压的续流熄弧条件和继电保护的动作条件确定，一般采用 10～40mm。在海拔 1000m 以上的地区，间隙应相应增大。

在线路故障情况下的特殊要求，主要是指采用单相重合闸的系统中性点直接接地的线路，这时由于各种主保护都要通过选相元件来跳闸，故选相元件能否正确动作关系很大，而选相元件能否正确动作又与线路的等效塔脚电阻有关，如果后者过大就可能不正确动作。为了保证等效塔脚电阻足够低，就可能需要适当压低地线的绝缘水平。这样才能在单相故障时有较多的杆塔，其地线绝缘会被击穿，从而使这些塔脚的接地电阻通过地线并联成一个低的等效接地电阻。等效塔脚电阻 Z_f 可按下式计算：

若两地线均绝缘，则

$$|Z_\mathrm{f}|\leqslant\left|\frac{Z_{11}-Z_{\mathrm{mn}}}{Z_{11}-Z_{\mathrm{mn}}}\right|\times\sqrt{\left(\frac{U_\mathrm{b}}{I_\mathrm{f}}\right)^2+\frac{R}{8}\left|\frac{Z_{11}-Z_{\mathrm{mn}}}{Z_{11}+Z_{\mathrm{mn}}}\right|}\tag{3-428}$$

若只有一根地线而且是绝缘的，则

$$|Z_\mathrm{f}|\leqslant\left|\frac{Z_{11}-Z_{\mathrm{mn}}}{Z_{11}}\right|\times\sqrt{\left(\frac{U_\mathrm{b}}{I_\mathrm{f}}\right)^2+\frac{R}{4}\left|\frac{Z_{11}-Z_{\mathrm{mn}}}{Z_{11}}\right|}\tag{3-429}$$

式中 Z_{11}——一档地线的自阻抗，Ω；

Z_{mn}——一档地线和导线间的互阻抗，Ω；

R——一基塔的接地电阻（按最大值考虑），Ω；

I_f——单相故障电流，A；

U_b——地线绝缘的工频击穿电压，V。

【例 3-11】某线路两地线均绝缘，求等效塔脚电阻。

解 从保证选相元件正确动作的角度看，在出口处短路要求最高。以出口 6km 处短路为代表：

I_f=6020A，U_b考虑取为 12kV，档距平均约为 0.4km，于是 Z_{11}=0.4×（2.24+j1.55）Ω，Z_{mn}=0.4×（0.05+j0.374）Ω，从而

$$Z_{11}-Z_{\mathrm{mn}}=0.992\angle 28.2^\circ$$

$$Z_{11}+Z_{mn}=1.2\angle 40^\circ$$

考虑到冬季冻结，R 取为 100Ω，代入式（3-428）得

$$Z_f \leqslant \frac{0.992}{1.2}\times\sqrt{\left(\frac{12000}{6020}\right)^2+\frac{100}{8}\frac{(0.992)^2}{1.2}}=3.15\ (\Omega)$$

据此即可以具体检查能否保证选相元件的正确动作。

2. 地线的绝缘结构

通常为了保护绝缘子，并为了使地线的耐压水平基本保持稳定，地线的绝缘结构采用无裙绝缘子并联火花间隙。无裙绝缘子，是由于这种绝缘子的造型与普通悬式绝缘子一样，只不过裙缘非常小而已。为了使地线绝缘具有一定的机械和电气可靠性，规程规定，地线绝缘时不宜使用单联单片悬式绝缘子串。

当地线全绝缘时，其绝缘方式如图 3-189 所示。若用作载波通信，则两端尚需装设结合设备（包括排流线圈及放电器等）。

图 3-189 双地线全绝缘图，图 3-190 为减少电能量的地线绝缘方式，若地线绝缘仅为了减少电能量时，其绝缘方式可如图 3-190 所示。这样，地线上感应电压较低，运行维护较安全。其中，图 3-190（a）用于耐张段较短的线路，图 3-190（b）用于耐张段较长的线路。

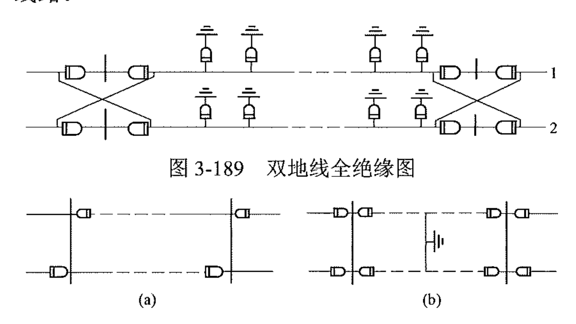


图 3-189 双地线全绝缘图

图 3-190 减少电能量的地线绝缘方式

五、光纤复合架空地线

光纤架空复合地线（Optical Fiber Composite Overhead Ground Wire，OPGW），是把光纤放置在架空输电线路的地线中，使其具有地线与通信双重功能。OPGW 具有可靠性高、机械性能优越、成本低等特点，在输电线路上广泛应用。

1. OPGW 分流计算

OPGW 的热稳定校验是 OPGW 选型的重要内容。对于双地线结构系统，当线路发生单相接地故障时，地线组形成如图 3-191 所示网络。

图 3-191 中每一个网孔的电阻、电抗和电势可用图 3-192 的参数表示。

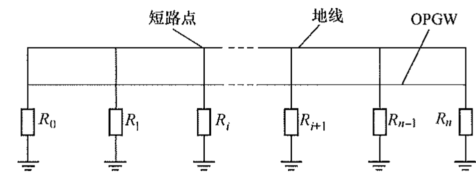


图 3-191 地线组合电气网络示意图

R_i——杆塔接地电阻，i=1，2，…，n，Ω/档。

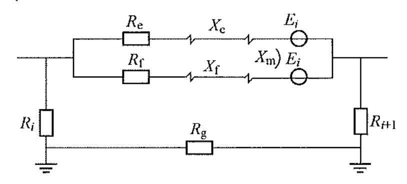


图 3-192 网孔内电气参数图

线路中一根地线用 OPGW，另一根地线用钢芯铝绞线、钢芯铝合金绞线或钢绞线，两根地线的阻抗为

$$Z_e=R_e+R_g+j(X_e-X_m) \quad (3\text{-}430)$$

$$Z_f=R_f+R_g+j(X_f-X_m) \quad (3\text{-}431)$$

式中 R_e——地线电阻；

R_f——OPGW 电阻，Ω/档；

X_e——地线自感抗，Ω/档；

X_f——OPGW 自感抗，Ω/档；

X——OPGW 和地线间互感抗，Ω/档；

R_g——地线与大地每档的等效电阻，Ω/档，$R_g=0.05l_d$，l_d 为档距，km。

计算地线电流时，可把两个阻抗合并成一阻抗 Z_i，有

$$Z_i=\frac{Z_e\cdot Z_f}{Z_e+Z_f}+X_m \quad (3\text{-}432)$$

故障时，导线对地线的互感作用将产生一个互感电动势 E_i，其值为

$$E_i=-jMI \quad (3\text{-}433)$$

式中 M——互感；

I——变电站流向故障点的短路电流。

假设线路在第 i 号塔发生短路，电流的分布如图 3-193 所示，利用网孔法列方程式如下：

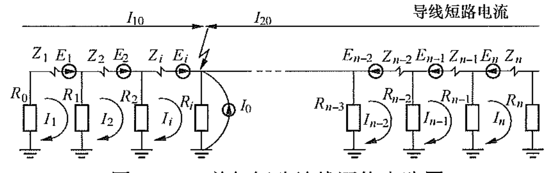


图 3-193 单相短路地线网络电路图

$$\left.\begin{aligned}
&(R_0+Z_1+R_1)I_1-R_1I_2=E_1\\
&-R_1I_1+(R_1+Z_2+R_2)I_2-R_2I_3=E_2\\
&-R_{i-1}I_{i-1}+(R_{i-1}+Z_i+R_i)I_i-R_iI_{i+1}=E_i-R_iI_0\\
&-R_iI_i+(R_i+Z_{i+1}+R_{i+1})I_{i+1}-R_{i+1}I_{i+2}=E_{i+1}+R_iI_0\\
&\qquad\vdots\\
&-R_{n-1}I_{n-1}+(R_{n-1}+R_n+Z_n)I_n=E_n
\end{aligned}\right\}$$

(3-434)

式中：I_{10}、I_{20}为两端变电站流向故障点的短路电流，I_0为总电流，$I_0=I_{10}+I_{20}$；I_i为地线各网孔的电流；R_0、R_n 为首末两端变电站的等效电阻；R_1，R_2，…，R_{n-1}为线路杆塔的接地电阻；Z_1，Z_2，…，Z_n 为合并后每网孔的电抗，E_1，E_2，…，E_n为感应电动势。

求解该 n 阶复数方程，再按照地线上的等效阻抗进行分配，可以求出 OPGW 及另一根地线上的电流。如另一根地线不是 OPGW，而是普通地线，则可将上式中 OPGW 的相应参数改为普通地线的参数即可。

2. OPGW 的短路电流控制水平和短路持续时间选择

（1） OPGW 短路电流控制水平的选择。短路电流容量 I^2t，是校验 OPGW 热稳定的关键指标。OPGW 的系统短路电流容量，由短路条件下 OPGW 的等效短路电流和短路电流持续时间确定。短路电流控制水平一般可按如下两种条件考虑：①OPGW 宜按电器选择原则进行校验，即按线路两端变电站（或电厂）设备允许的短路电流控制水平考虑。②考虑到发电厂与变电站的建设周期较线路长，可按投产后的 5～10 年电力系统发展规划考虑。对于已建工程的 OPGW 工程，也可按当前电力系统短路水平校验。在工程设计中，究竟采用按那种条件考虑，设计者可根据工程具体情况确定。

（2） 短路持续时间的选择。根据 DL/T 5404—2007，OPGW 的短路电流持续时间目前主要有两种取值思路。第一种思路考虑系统单相短路故障后，主保护动作，短路切除，按要求进行重合闸，由于故障未消除，重合闸不成功，主保护再次动作。短路电流持续时间由短路电流等效时间包括保护动作时间、通道延时、断路器动作时间，重合闸及保护再次动作时间和短路电流的非周期分量的等值时间组成。对于 220kV 及 500kV 线路，取值 0.25～0.3s。第二种思路考虑系统出现短路故障后，主保护不动作，由失灵保护动作，不考虑重合闸与短路电流的非周期分量，取值仍然是 0.25～0.3s。

从实际工程意义上来说，目前国内主要线路均采用微机保护，主保护不动作概率极低，可不予考虑；但自动重合闸和非周期分量均是实际工程中不容忽视的因素。在短路电流持续时间中考虑自动重合闸及其影响是适宜的。目前继电保护装置和断路器设备制造水平均有提高，质量也更为稳定，并广泛地运用在新建 220kV 及以上线路上。因此对于 220kV 及以上线路，短路时间可按第一种思路考虑：保护动作时间 50ms、断路器动作时间 30ms、重合闸及保护再次动作时间 80ms、短路电流的非周期分量的等值时间 50～80ms[❶]组成。根据系统情况建议取值为 0.25～0.3s。

110kV 线路主保护方式主要采用距离保护，设计情况有一定的区别。距离保护在保护的原理上，为区分线路故障和对侧母线故障，避免由对侧母线故障引起线路保护的误动作，一般将保护的距离设置为 80% 的线路长度，并且一般仅设置一套保护装置，在主保护的保护范围内故障动作时间可根据系统整定取 0.3～0.5s；如果短路出现在 80%以外，需由上一级的保护动作来跳掉故障线路，动作时间将由保护整定值确定，大致在 0.5～3s。考虑到远故障点的电源提供的电流将随线路长度迅速衰减，因此 110kV 线路应分别按两端变电站提供的短路电流，以及对应的短路电流切除时间对 OPGW 进行校验。66kV 线路为不直接接地系统，单相短路电流很小，可不对 OPGW 进行校验。

3. OPGW 的防雷

在短路故障和雷击地线时，雷电流流经地线引起线体瞬间发热。在雷击时通过地线的雷电流可能很大，达到 120～200kA，但由于其通流时间很短，一般为几微秒至几十微秒。雷电流的持续时间很短（微秒级），其通流量远小于 OPGW 允许的工频通流容量（I^2t），故对 OPGW 的热稳定不造成影响，不会因 OPGW 线的整体发热使纤芯受损或发生传输损耗增大等情况，因此，可不对雷击进行短路电流的热稳定校验。雷击虽然不会造成 OPGW 线的整体发热，却可能造成断股事故。根据我国 220、500kV 线路运行经验，以及国外对雷击试验的总结认为，当镀锌钢线的单股直径在 2.5mm 以上时，雷击才不易造成地线损伤。因此雷暴日数 40 及以上地区选择 OPGW 时，应尽量使用铝包钢线或镀锌钢线，外层股线直径宜大于 2.8mm，不宜采用铝包钢和铝合金混绞结构。对于超高压及以上线路，由于地线截面一般较大，外层股线直径宜大于 3.0mm。试验和运行经验均证明，材料股线的抗雷击性能与其直径成正比，与其导电率成反比。故应在满足工频短路电流容量（I^2t）的前提下，尽量选用 20% IACS 的铝包钢线。当前，OPGW 要求采用专门的接地线可靠接地，而不只是仅利用导线金具与杆塔相连作接地。在热稳定校核中，当要求地线具有分流作用时，分流地线也应可靠接地。对无分流要求的其余段地线，可采用分段绝缘单点接地方式。地线分段绝缘的目的主要是减少地线的电能损失，地线电能损失由线间环流分量和地中分量两个方面构成，线间环流分量远大于地中分量，在线路运行中只要将一根地线绝缘，即可消除线间环流分量。

❶ 非周期分量等值时间的取值见《导体和电器选择设计技术规定》。

近年来，在一些地区的电网运行过程中，发现有些输电线路上绝缘地线上的雷击事故率要低于有可靠接地的OPGW，因此，不少业内人士提出了也应该将OPGW对地绝缘的建议，并提出了具体实施方案，现一并列出可供参考。至于具体工程中OPGW采用何种设计，可视工程具体情况确定。

4. OPGW分段绝缘单点接地运行方式

普通地线分段绝缘单点接地运行方式分为两种：一种是耐张段较短的线路，采用一端接地、另一端绝缘的方式，如图3-194所示；另一种是耐张段较长的线路，采用两端绝缘，中间一点接地，如图3-195所示。OPGW采用分段绝缘单点接地运行方式时，按照接地点不同，可以分为以下三种方式。

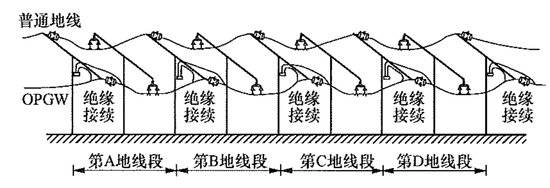


图3-194　方式一一端绝缘一端接地

方式一如图3-194所示，OPGW每基接续塔一侧绝缘引下，另一侧常规接地引下，两侧的OPGW在绝缘接续盒两端进行电气隔离，并完成光纤接续。绝缘接续盒与地线绝缘子一样，可以采用一端高电位、一端地电位，且全线使用一种绝缘接续盒。中间的直线塔则通过带并联间隙的绝缘子与OPGW绝缘，此种接地方式与普通地线的分段绝缘、端点接地方式一致。

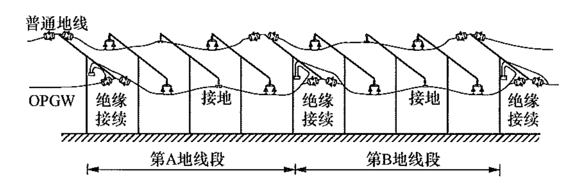


图3-195　方式二两端绝缘中间一点接地

方式二如图3-195所示，与普通地线的分段绝缘、中间一点接地方式一致。OPGW每基接续塔采用绝缘引下，两侧OPGW在绝缘接续盒两端电气隔离，绝缘接续盒必须是高电位，且全线使用一种绝缘接续盒。其余的直线塔则通过带并联间隙的绝缘子与OPGW绝缘。方式二与方式一相比，接地点位于绝缘段的中间，则OPGW上的最大感应电压约为方式一的一半。但是，接续盒需与铁塔绝缘，处于高电位，使得接续装置复杂。

方式三如图3-196所示，是将OPGW的某一个接续点作为接地点，使用常规的接续盒，两侧两个接续点绝缘，采用绝缘接续盒与方式二一样，需与铁塔完全绝缘，处于高电位，如图3-196所示。与方式一和方式二比较，方式三可以交替使用绝缘接续盒和常规接续盒，节省了一半绝缘接续盒。采用何种方式按照盘长和工程情况确定。

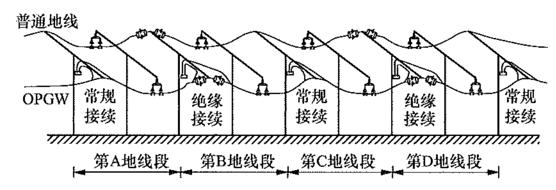


图3-196　方式三中间接续点一点接地

OPGW采取分段绝缘单点接地运行方式后，接地点电势为零，但接地点两侧的OPGW上均存在对地感应电动势，距离接地点越远，感应电动势越大。当OPGW沿着铁塔绝缘引下时，接续盒上端也为带电体。因此在接续盒检修时应有可靠的可开断的接地装置。

六、地线（OPGW）热稳定计算

地线（OPGW）允许短路电流容量可采用制造厂提供的技术资料，必要时通过试验确定；OPGW在验算短路热稳定时OPGW的允许温度，应根据OPGW产品技术资料和试验情况确定。短路起始温度宜采用最高气温月日最高气温的平均值（取多年平均值）。该电流的计算公式如下

$$I=\sqrt{\frac{C}{0.24a_0R_0T}\times\ln\frac{a_0(t_2-20)+1}{a_0(t_1-20)+1}} \qquad (3\text{-}435)$$

式中　I——地线验算短路热稳定允许电流，A；

C——载流部分的热容量，cal/℃；

a_0——载流部20℃时的电阻温度系数，℃$^{-1}$；

R_0——载流部20℃时的电阻，Ω；

T——计算短路热稳定的时间，s；

t_1——地线初始温度，℃；

t_2——地线短路热稳定允许温度，℃。

式（3-435）中载流部分的热容量C按下式计算。

$$C=\sum_{n}^{i=1}C_i\rho_iA_i \qquad (3\text{-}436)$$

式中　C_i——第i种导体比热，cal/（kg·℃）；

ρ_i——第i种导体的密度，g/cm^3；

A_i——第i种导体的截面积，cm^2。

各种金属材料的参数见表3-112。

表 3-112 各种金属主要参数表

参数＼材料	铝	铝合金线	铝合金管	钢	20AC 铝包钢
比热 [cal/(kg·℃)]	222	222	222	116.5	131.8
密度 (kg/m^3)	2703	2700	2700	7800	6590
电阻率/(Ω·m, 20℃)	28.264×10^{-9}	32.8×10^{-9}	38×10^{-9}	195×10^{-9}	84.9×10^{-9}
电阻温度系数/(1/℃, 20℃)	0.00403	0.0036	0.0036	0.0054	0.0051

验算短路热稳定时，地线的允许温度：钢芯铝绞线和钢芯铝合金绞线可采用 +200℃；钢芯铝包钢绞线（包括铝包钢绞线）可采用 +300℃；镀锌钢绞线可采用 +400℃；光纤复合架空地线（OPGW）的允许温度应采用产品试验保证值。OPGW 还应对耐雷击性能进行校验。计算时间和相应的短路电流值应根据系统情况决定。

计算 OPGW 短路热稳定允许电流，也可按 1993 年国际电工委员会颁布的 IEC 865-1《短路电流热效应计算 定义和方法》进行计算。

目前国内地线或 OPGW 的承力部分基本采用铝包钢绞线，而且采用的铝包钢线导电率的品种较多，为便于计算，现将 YB/T 123—2017《铝包钢丝》列出的各型铝包钢丝的技术参数列于表 3-113。

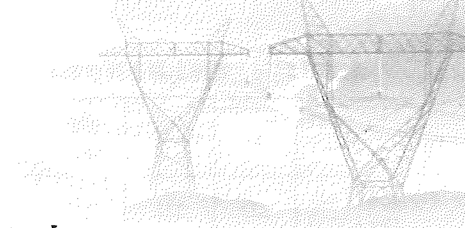
表 3-113 各型铝包钢丝技术参数表

参数	20AC	23AC	27AC	30AC	33AC	40AC
电阻率 ($\Omega\cdot mm^2/m$)	0.0848	0.0750	0.0639	0.0575	0.0522	0.0431
电阻温度系数 (1/℃)	0.0036	0.0036	0.0036	0.0038	0.0039	0.0040

七、地线表面电场强度要求

一般 500kV 及以下线路，地线表面电场强度不会成为地线选择的控制条件，但对 750kV 及 1000kV 线路，由于地线处于导线的强电场环境中，有可能在地线上产生很大的表面电场强度，当其超过地线起始电晕电场强度时，亦会产生电晕损失。无线电干扰和可听噪声等，因此，必须予以限制。

根据以上情况，并考虑到我国超高压线路导线表面场强与起晕场强之比为 0.8～0.85，故 GB 50665—2011《1000kV 架空输电线路设计规范》规定："地线（包括光纤复合架空地线）除应满足短路电流热容量要求外，应按电晕起晕条件进行校验，地线表面静电场强与起晕场强之比不宜大于 0.8。"一般情况下，1000kV 单回路线路地线外径不宜小于 17mm，双回线路地线外径不宜小于 24mm。



第四章

直流线路电气部分

第一节　导线载流量

第三章第二节对导线载流量的计算方法进行了介绍，直流架空线路和交流架空线路导线载流量的计算原理相同，仅直流线路采用直流电阻，交流线路采用交流电阻。

直流电阻与导体所用材料的电阻率和环境温度有关，它们之间的关系如式（4-1）所示：

$$R_d = R_{20}[1 + a(T_c - 20)] \tag{4-1}$$

式中　R_{20} ——导线20℃时的直流电阻，Ω/m；

a ——温度系数，1/℃；

T_c ——导体工作时的温度，℃。

常用型号的直流线路导线的载流量如表4-1所示。

表 4-1　常用型号的直流线路导线的载流量表

标称截面积（铝/钢）（mm²）	结构［根数/直径（mm）］		外径（mm）	直流电阻	导线载流量（A）			
				不大于	环境温度25℃		环境温度35℃	
	铝	钢		Ω/km	70℃	80℃	70℃	80℃
400/35	48/3.22	7/2.50	26.8	0.0739	804	917	673	808
500/45	48/3.60	7/2.80	30.0	0.0591	925	1058	772	931
630/45	45/4.20	7/2.80	33.6	0.0463	1076	1233	895	1084
720/50	45/4.53	7/3.02	36.23	0.0398	1183	1358	981	1193
800/55	45/4.80	7/3.20	38.4	0.0355	1271	1462	1053	1283
900/40	72/3.99	7/2.66	39.9	0.0321	1350	1554	1116	1363
1000/45	72/4.21	7/2.80	43.2	0.0289	1452	1675	1198	1468
1120/50	72/4.45	19/1.78	44.5	0.0258	1549	1788	1276	1566
1250/70	76/4.58	7/3.57	47.35	0.0229	1670	1932	1373	1690

注　风速0.5m/s、日照强度1000W/m²、黑线系数0.93。

表4-2列举了国内直流工程的额定运行电流和其电流密度。

表 4-2　国内直流工程电流密度

投产年份	电压等级（kV）	输送容量（MW）	导线方案	导线铝部总截面积（mm²）	极导线额定电流（A）	电流密度（A/mm²）
2011	±400	1200	4×JL/G1A-400/35	1563	1500	0.960
2004	±500	3000	4×JL/G2A-720/50	2901	3000	1.034
2010	±660	4000	4×JL/G3A-1000/45	4009	3333	0.831
2010	±800	5000	6×JL/G1A-630/45	3741	3125	0.829
2010	±800	6400	6×JL/G2A-720/50	4352	4000	0.912
2012	±800	7200	6×JL/G3A-900/40	5402	4500	0.833
2014	±800	8000	6×JL/G3A-900/40	5402	5000	0.926
2014	±800	8000	6×JL/G3A-1000/45	6014	5000	0.831
2017	±800	8000	6×JL1/G3A-1250/70	7512	5000	0.666
2017	±800	10000	8×JL1/G3A-1250/70	10017	6250	0.624
2018	±1100	12000	8×JL1/G3A-1250/70	10017	5455	0.545

由表4-2可以看出，近期国内直流工程的输送容量逐步增大；随着原材料价格的降低及电价的增长，电流密度有变小的趋势。

第二节　电　晕

导线的电晕放电，会对输电线路电磁环境造成一定的影响，当导线表面电场强度超过某一临界值（起晕电场强度）时，高压场强使得导线周围的空气产生一系列的电离，最终出现导线的电晕放电现象。

由于直流电压作用形式不同，直流线路电晕的发展过程和交流线路有很大差别。交流线路发生电晕时，由于导线电压的极性周期性变化，电晕电荷只在导线附近很小的区域内做往返运动。而直流线路发生电晕时，由于导线的极性固定不变，与导线极性相反的电荷被拉向导线，与导线极性相同的电荷将背离导线，呈正、负两种极性电晕放电模式，从而使得两极、极导线与大地间的整个空间均充满带电离子。

当直流线路发生电晕时，按电离的发生情况可将除导线以外的空间分为电离区和非电离区。一般在紧贴导线附近形成电离区，非电离区则位于两极、极导线与大地间的几乎整个区域。在电离区内，电场强度很高，气体分子发生电离，产生的电子被电场加速后又与其他分子碰撞，使电离雪崩式发展。与导线极性相反的带电离子朝导线方向运动，最后在导线表面或附近被中和；与导线极性相同的离子向背离导线的方向运动，最终被排斥到电离区以外。在两极导线间除正负离子运动外，还存在带电离子的复合与中和现象。上述电离区和非电离区带电离子的运动，形成了直流输电线路上的电晕电流。

一、导线表面状况、大气条件对电晕的影响

（一）导线表面状况对电晕的影响

国内外相关研究表明，导线电晕特性与导线表面状况密切相关。电力线中的金属导体在潮湿、污染的空气中发生化学反应，在腐蚀或氧化作用下，电线形成坑洼不平的表面，使得电晕放电特性发生改变。皮克通过大量的试验给出了适用于交流线路的电晕起始电场强度的计算公式，其直流表达形式详见式（4-6）。

皮克通过实验求取导线表面起始电晕场强时，采用的是光滑导线，用系数 m 表征导线的粗糙程度，对于表面光滑的理想导线 $m=1$，实际导线是采用多股绞线，导线在制造和架设过程中造成一些伤痕，运行中还会有尘埃、昆虫、鸟粪和水滴等附着在表面上，以上诸多情况将使得导线表面变得粗糙，为此还需要用粗糙系数 m 进行校正。

对于交流线路，理想光滑导线的 m 值取 1；对于洁净的分裂导线，m 取值范围为 0.7～0.9；对于有刮痕、缺陷点的分裂导线，m 取值范围为 0.5～0.7；对于表面存在鸟粪、污秽、雨、雪等情况，m 取值范围为 0.3～0.5；对于重污秽、大雨、大雾等情况，m 值取 0.2。

直流输电线路的 m 取值一般在 0.4～0.6 之间。我国±800kV 特高压直流输电工程在进行电磁环境前期研究时，晴天和雨天条件下的 m 值分别取 0.49 和 0.38，晴天和雨天条件下的起晕电场强度分别约为 18kV/cm 和 14kV/cm。

表 4-3 给出不同导线在 20℃，1 个标准大气压条件下的晴天起晕电场强度。

表 4-3　各种导线的起晕电场强度

导线铝截面（mm^2）	300	400	500	630	720	800	900	1250
导线直径（mm）	23.9	27.6	30	4.2.8	36.2	38.4	40.6	47.9
起晕电场强度（kV/cm）	18.76	18.48	18.33	18.12	18.00	17.91	17.82	17.57

注　导线表面粗糙系数 m 值取 0.49。

（二）大气条件对电晕的影响

天气情况是指发生在大气中的各种自然现象，即某瞬时内大气中各种气象要素（如气温、气压、湿度、风、云、雾、雨、闪、雪、霜、雷、雹、霾等）空间分布的综合表现。

输电线路的电晕放电强弱随季节变动在某种程度上可以解释为随周围温度的变化。电晕起始电压在冬天最高，在夏天最低。随着空气密度和湿度增加，起晕场强将减小。

对于直流输电线路，雨天时的电晕放电强度及由此产生的无线电干扰和可听噪声反而比晴天时的小，这与交流输电线路的情况差别很大。雨天时导线的起晕场强比晴天时低，直流线路导线周围的离子比晴天时多，在下雨初期，导线表面离子浓度不大时，电晕放电与交流线路类似，比晴天时稍强，下雨延续一段时间后，导线起晕场强进一步降低，导线表面离子增加，使得导线不规则的面被较浓的电荷所包围，因而减小电晕放电强度。

在输电线路设计中，通常在考虑天气因素时，将其分为好天气（晴天导线干燥）和坏天气（下雨和潮湿天气）两种类型。对于交流输电线路，当有风时，负半周产生的空间电荷容易被吹掉，这使得正极性流注更活跃；当无风时，该空间电荷将减弱电晕源的表面电位梯度，从而对正极性流注的形成具有抑制作用。对于直流输电线路，有风时也使电晕放电更活跃。

空气污染越严重，电晕放电越强；空气密度越小，电晕放电越强；空气湿度越大，电晕放电越强。

二、导线表面电场强度计算

直流线路电晕放电的严重程度直接和导线表面电场强度，特别是导线表面最大电场强度有关。直流线路导线表面电场强度常用的计算方法有经

验公式法、逐步镜像法以及模拟电荷法等。经验公式法计算简便，其精度一般可以满足工程计算的要求，但不能准确反映分裂导线子导线表面电场强度；逐步镜像法和模拟电荷法计算精度高，但需要借助计算机完成计算。

（一）经验公式法

1. 单极性线路

瓦格纳（Wagner）提出的计算单极性直流线路导线表面最大电场强度公式为：

$$g_{max}=\frac{2U(1+B)}{nd\ln\frac{2H}{r_{eq}}} \tag{4-2}$$

式中 g_{max}——导线表面最大电场强度，kV/cm；

U——极导线对地电压，kV；

n——导线分裂数；

d——导线直径，cm；

H——导线对地高度，cm；

r_{eq}——分裂导线等效半径，cm，$r_{eq}=R\sqrt[n]{\frac{nd}{2R}}$，其中 R 为通过 n 根子导线中心的圆周半径，cm；

B——分裂系数，取决于分裂根数，两分裂时 B=2d/2b，三分裂时 B=3.464d/2b，四分裂时 B=4.24d/2b，六分裂时 B=5.31d/2b，其中 b 为分裂导线的分裂间距，cm。

2. 双极性线路

（1）双极单根导线。

安汤姆逊（Adamson）和辛哥拉尼（Hingorani）提出的计算双极线路单根导线表面最大电场强度公式为：

$$g_{max}=\frac{U}{r\ln\left[\frac{s}{r}\cdot\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{s}{2H}\right)^2}}\right]\left(1+\frac{r}{H}\right)^2}\approx\frac{U}{r\ln\left[\frac{s}{r}\cdot\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{s}{2H}\right)^2}}\right]} \tag{4-3}$$

式中 g_{max}——导线表面最大电场强度，kV/cm；

U——极导线对地电压，kV；

s——极导线间距（以下简称极间距），cm；

r——导线半径，cm；

H——导线对地高度，cm。

（2）双极分裂导线。

对于双极分裂导线，EPRI 给出用梯度因子 g'[kV/(cm·kV)]来近似计算导线表面最大电场强度的计算方法，该方法被称为马克特—门得尔法。

$$g_{max}=Ug' \tag{4-4}$$

$$g'=\frac{1+(n-1)\frac{r}{R}}{nr\ln\left[\frac{2H}{\left(nrR^{n-1}\right)^{1/n}\sqrt{\frac{4H^2}{s^2}+1}}\right]} \tag{4-5}$$

式中 g_{max}——导线表面最大电场强度，kV/cm；

g'——梯度因子，kV/（cm·kV）；

U——极导线对地电压，kV；

r——导线半径，cm；

R——通过 n 根子导线中心圆周的半径，cm；

H——导线对地高度，cm；

s——极间距，cm；

n——导线分裂数。

（二）逐步镜像法

逐步镜像法也称逐次镜像法，此计算导线表面场强的方法详见第三章。

（三）模拟电荷法

模拟电荷法由 H.Steinbigler 提出，属于等效源的方法，是目前静电场数值计算的一种主要方法，此计算导线表面场强的方法详见第三章。

（四）典型导线的表面最大电场强度

采用马克特—门得尔法，按表 4-4 给出的基本技术参数，计算出单回双极直流线路在不同导线截面、不同极间距情况时的导线最大表面电场强度，如图 4-1 所示，图中符号 d 表示导线直径。

表 4-4 各种电压等级基本技术参数

电压等级	±400kV	±500kV	±660kV	±800kV	±1100kV
导线标称铝截面（mm²）	300～500	400～900	720～1250	630～1250	800～1250
导线直径（mm）	23.9～30	27.6～40.6	36.2～47.9	33.8～47.9	38.4～47.9
分裂根数	4	4	4	6	8
导线分裂间距（mm）	450	450	500	500	550
导线高度（m）	10	12	16	18	26

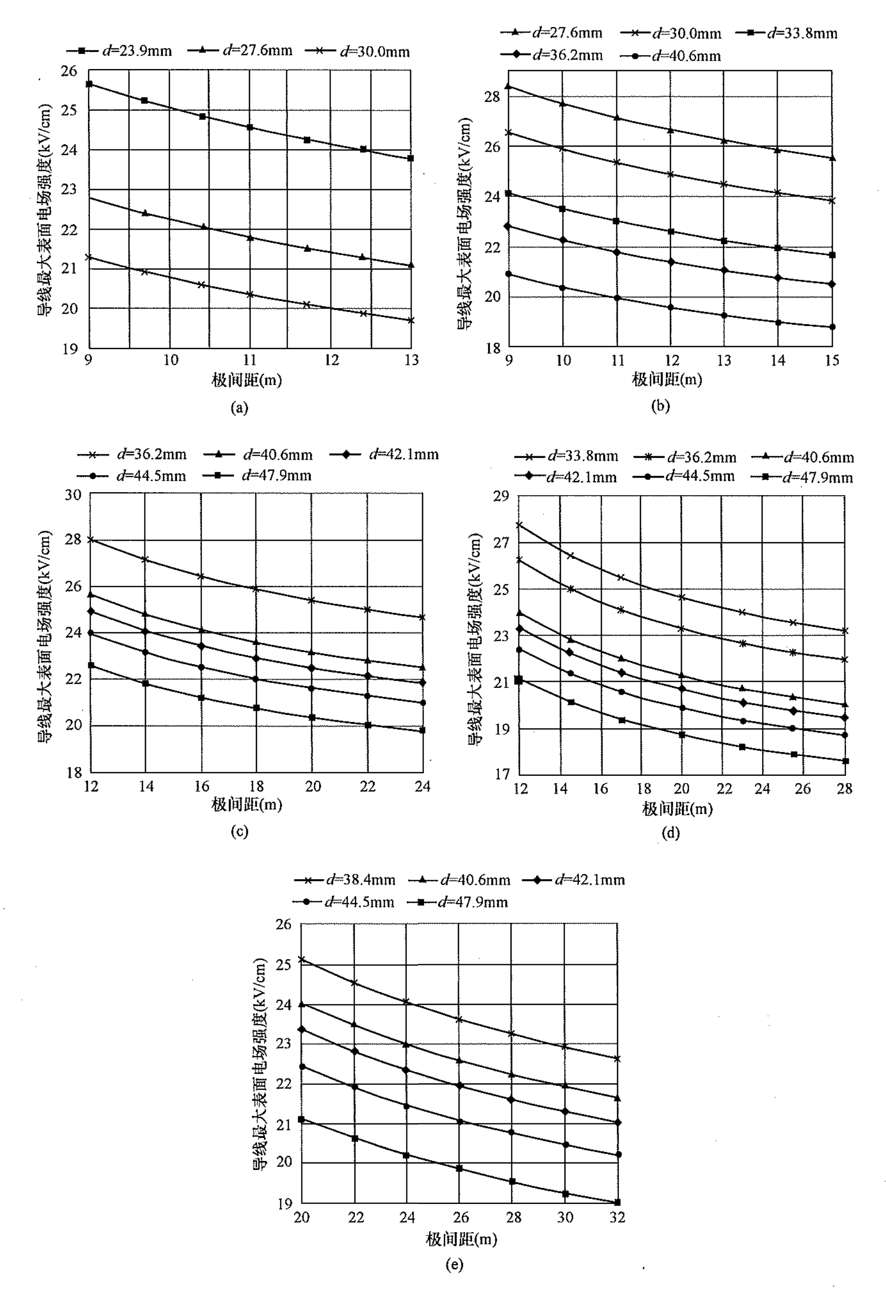


图 4-1 单回双极直流线路不同极间距情况时导线最大表面电场强度

（a）±400kV 直流线路；（b）±500kV 直流线路；（c）±660kV 直流线路；（d）±800kV 直流线路；（e）±1100kV 直流线路

由图 4-1 可知，导线最大表面电场强度随着极间距和导线直径的增大而减小。

三、导线电晕临界电场强度

线路电晕是在导线表面电场强度超过某一临界值后才开始产生，这一临界值通常称为起晕电场强度，或电晕临界电场强度。皮克是最早研究线路电晕的，他通过大量的试验给出了适用于交流线路的起晕电场强度的计算公式。

假设直流输电线路导线起晕电场强度和交流线路起晕电场强度的峰值相同，皮克公式可用于计算直流电压作用下导线的起晕场强：

$$g_0 = 30m\delta^{\frac{2}{3}}\left(1+\frac{0.301}{\sqrt{r}}\right) \tag{4-6}$$

其中

$$\delta = 289\times10^{-5} p/(273+t) \qquad (4\text{-}7)$$

式中 g_0——导线起晕场强，(kV/cm)；
m——导线的表面粗糙系数；
δ——大气校正系数；
r——导线半径，cm；
p——大气压强，Pa；
t——温度，℃。

由式（4-6）可知，导线电晕起始电场强度不是一个常数，小直径导线的电晕起始电场强度高于大直径的导线。它的物理意义是：要使线路电晕放电能够自持，除导线表面场强需要足够大外，距导线一定距离的周围空间也需足够大的场强。小直径导线的空间场强随着离开导线距离的增加而衰减程度较大直径的导线快，因此，为了维持周围空间一定的场强，小直径导线的表面必须具有更高的场强才能使放电自持。

四、地线电晕

对于高压直流输电线路，由于地线上的感应电荷较大，有可能在地线表面产生很大的标称电场强度（不考虑空间电荷和带电粒子产生的电场，也称静电场，下同），当它超过地线起始电晕电场强度时，亦会产生电晕。工程设计时，通常对地线的表面电场强度进行一定的限制。

（一）地线表面电场强度的限值

我国早期的直流输电线路地线选择时，计算对比了直流线路合成电场时地线的起始电晕电场强度，并考虑到海拔高度的影响以及导线的电晕会使地线表面电场强度增大等因素，线路正常运行时，地线表面的标称电场强度一般按不超过12kV/cm左右控制。近来设计的特高压直流输电线路，根据中国电力科学研究院的计算和现场测试结果，地线的表面电场强度有所放宽，选择地线直径时，按标称电场强度不超过18kV/cm作为控制条件。

（二）地线表面电场强度的计算方法

直流输电线路的地线是否发生电晕、地线电晕放电的严重程度直接和地线表面电场强度的大小，特别是表面最大电场强度有关，在直流输电线路地线选择时，需要计算地线的表面电场强度，并将其控制到合理的程度。地线表面的标称电场强度计算方法很多，工程中常采用的有逐次镜像法和模拟电荷法等，逐次镜像法采用的较多且比较准确，但计算较为复杂。

对于工程设计中的地线表面电场强度计算，也可采用下文给出的近似公式。

1. 两根单地线、极导线水平布置的双极输电线路

对于分裂导线按正多边形布置的输电线路，导线表面平均电位梯度 G_{av} 可用式（4-8）计算

$$G_{av} = \frac{2U}{nd\cdot\ln\left(\dfrac{\dfrac{4H}{D_{eq}}}{\sqrt{1+\left(\dfrac{2H}{P}\right)^2}}\right)} \qquad (4\text{-}8)$$

式中 U——极导线对地电压，kV；
n——极导线的分裂根数；
d——子导线直径，cm；
H——导线平均高度，cm；
P——极间距离，cm；
D_{eq}——极导线的等效直径，cm，$D_{eq}=D\sqrt[n]{\dfrac{nd}{D}}$，其中 D 为通过 n 根子导线中心的圆周直径，cm。

假定极导线和地线均对称布置、两极导线上的电荷数值相等但极性相反、两根地线的电荷也数值相等极性相反，地线表面标称电场强度 G_{avw} 可按式（4-9）计算

$$G_{avw} = G_{av}\cdot\frac{nd}{d_W}\cdot\frac{\ln\left(\dfrac{A_1}{A_2}\right)}{\ln\left(\dfrac{T_W}{F_W}\right)} \qquad (4\text{-}9)$$

$$A_1 = \sqrt{\frac{\left(\dfrac{P}{2}-\dfrac{P_W}{2}\right)^2+(H_W+H)^2}{\left(\dfrac{P}{2}-\dfrac{P_W}{2}\right)^2+(H_W-H)^2}} \qquad (4\text{-}10)$$

$$A_2 = \sqrt{\frac{\left(\dfrac{P}{2}+\dfrac{P_W}{2}\right)^2+(H_W+H)^2}{\left(\dfrac{P}{2}+\dfrac{P_W}{2}\right)^2+(H_W-H)^2}} \qquad (4\text{-}11)$$

$$F_W = \sqrt{1+\left(\frac{2H_W}{P_W}\right)^2} \qquad (4\text{-}12)$$

$$T_W = \frac{4H_W}{d_W} \qquad (4\text{-}13)$$

式中 A_1、A_2、F_W、T_W——与地线有关的几何参数；
d_W——地线直径，cm；
H_W——地线平均高度，cm；
P_W——两根地线间的水平距离，cm。

其余符号意义与式（4-8）相同。

图 4-2 为双地线、水平双极直流输电线路的布置示意图。

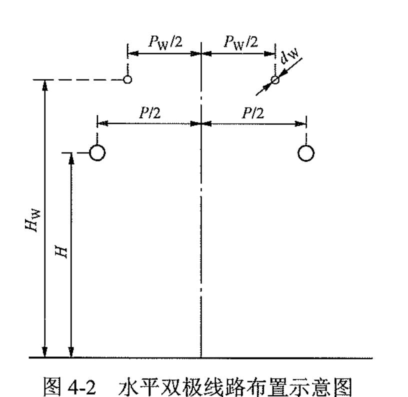


图 4-2 水平双极线路布置示意图

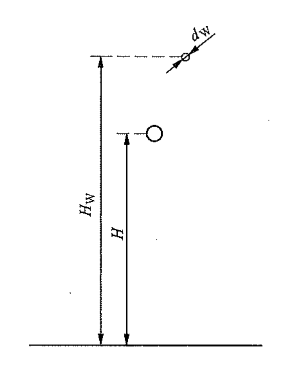


图 4-3 单地线、单极线路的布置示意图

2. 单根单地线、单极输电线路

对于分裂导线按正多边形布置的直流输电线路，导线表面平均电位梯度 G_{av} 可用式（4-14）计算

$$G_{av}=\frac{2U}{nd\cdot\ln\left(\frac{4H}{d_{eq}}\right)} \tag{4-14}$$

地线表面标称电场强度 G_{avw} 可按式（4-15）计算

$$G_{avw}=G_{av}\cdot\frac{nd}{d_W}\cdot\frac{\ln\left(\frac{H+H_W}{H-H_W}\right)}{\ln(4H_W\cdot d_W)} \tag{4-15}$$

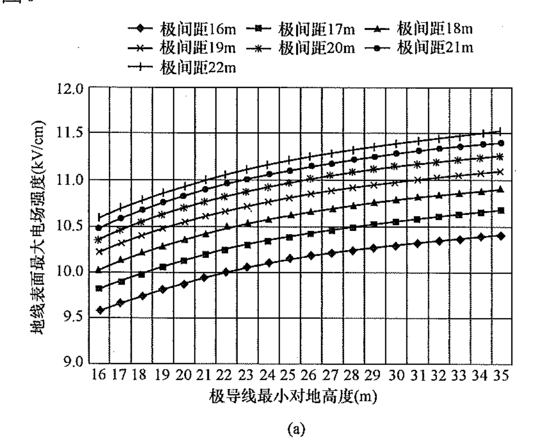
上两式中符号意义与式（4-8）相同。

图 4-3 为单地线、单极直流输电线路的布置示意图。

前述的逐次镜像法和模拟电荷法，以及按式（4-9）或按式（4-15）得到的地线表面电场强度均为标称电场强度，是按极导线和地线均不发生电晕计算的（不考虑空间电荷和带电粒子产生的电场）。实际上，直流输电线路的导线一般均处于电晕状态，而极导线的电晕会明显增大地线的表面电场强度。有资料显示，一条双地线的±400kV 直流输电线路，在线路不发生电晕时，地线的表面电场强度为 2.9kV/cm；而当导线严重电晕时，地线的表面电场强度可达到 10.9kV/cm。

当考虑空间电荷和带电粒子产生的电场（考虑导线电晕的影响）时，地线表面电场强度的计算非常复杂。对于线路发生电晕时的地线表面电场强度计算以及地线电晕等问题，有关科研单位正在进行研究。

图 4-4 给出了特高压直流输电线路典型地线在不同导线极间距的情况下，表面最大电场强度的计算结果。



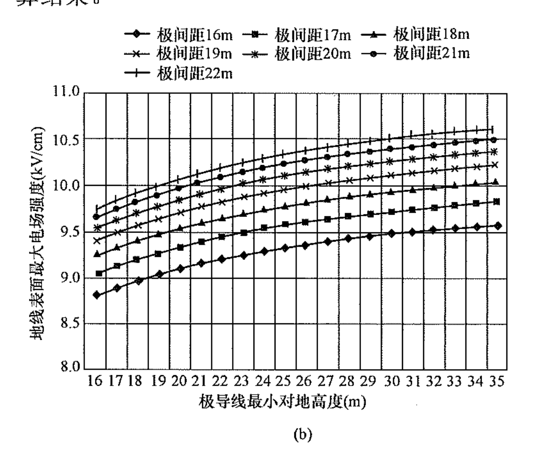


图 4-4 特高压直流输电线路典型地线表面最大电场强度（一）

（±800kV，导线 6×JL/G3A-900/40，导地线垂直距离 15m）

（a）地线截面积 120mm²；（b）地线截面积 150mm²

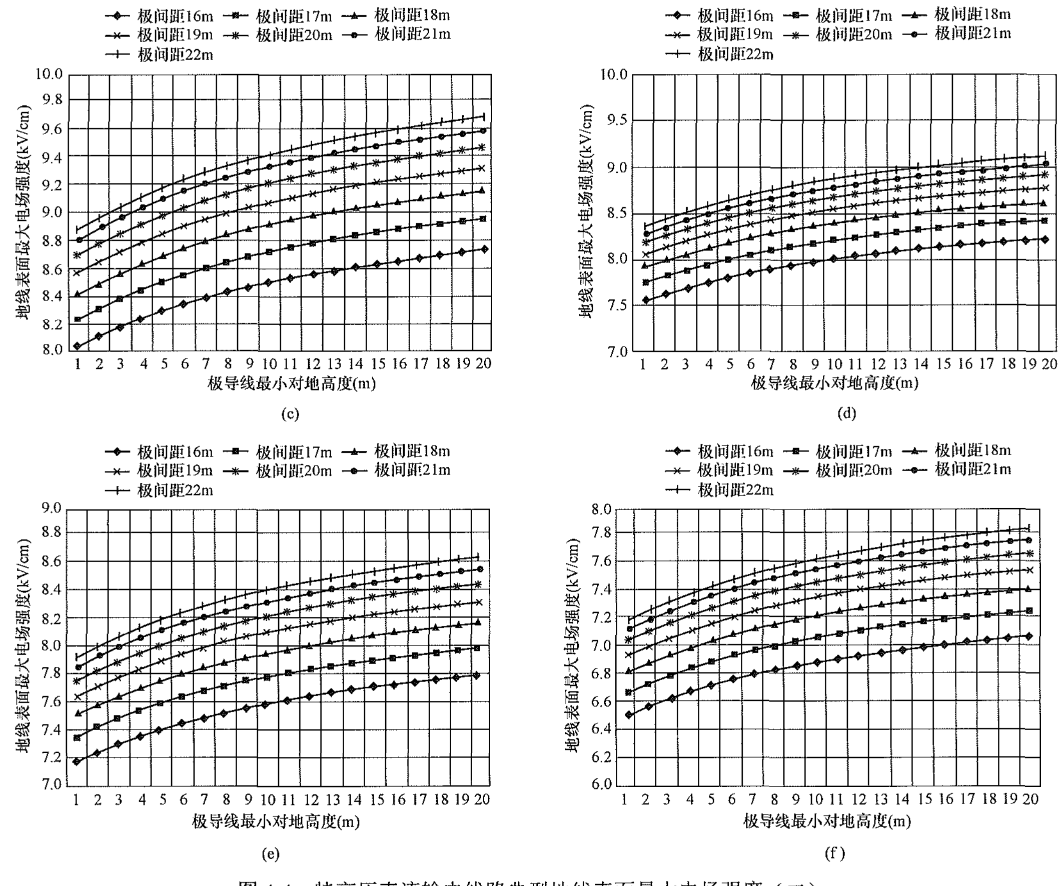


图 4-4 特高压直流输电线路典型地线表面最大电场强度（二）

（±800kV，导线 6×JL/G3A-900/40，导地线垂直距离 15m）

（c）地线截面积 180mm²；（d）地线截面积 210mm²；（e）地线截面积 240mm²；（f）地线截面积 300mm²

第三节 电 能 损 失

直流输电线路电能损失包括导线电阻损失、电晕损失、由地线引起的电能损失和绝缘子串泄漏电流引起的电能损失等。其中，后两者较小，可以忽略不计，工程设计时主要考虑导线的电阻损失和电晕损失。

一、电阻损失计算

直流输电线路的电阻损失与极导线电阻和流经导线的电流有关。直流输电线路中的谐波电流一般很小，其引起的电阻损失可以忽略不计，直流输电线路的电阻损失通常仅考虑直流电流引起的损失，单位长度电阻功率损失可按式（4-16）计算：

$$\Delta P_d = I_d^2 R_d \quad (4\text{-}16)$$

式中 ΔP_d ——直流输电线路单位长度的电阻功率损失，W/km；

I_d ——线路上的直流电流，A；

R_d ——直流线路单位长度的电阻，Ω/km。

R_d 的计算与直流系统的运行方式有关。对于双极直流输电线路，双极正常运行时，略去不平衡电流影响，R_d 取两极导线电阻之和；当单极大地回线方式运行时，R_d 取单极导线的电阻；当双极导线并联、单极大地回线方式运行时，R_d 取两极导线的并联电阻。

国内典型的±500～±800kV 直流线路单位长度电阻功率损失计算值见表 4-5。由于线路电阻功率损失与线路长度成正比，因此，表中用千公里电阻损失率来表征线路长度为 1000km 时电阻功率损失与线路额定输送功率的比值。从表 4-5 中数据可以看出，我国典型的±500kV 直流线路的千公里电阻损失率一般为 6.38%～7.07%，±800kV 直流线路一般为 2.43%～3.67%。电压和输送功率相同时，单位

长度电阻功率损失与千公里电阻损失率均随导电截面的增大而降低。

表 4-5 直流线路双极额定功率运行时单位长度电阻功率损失

电压等级	线路名称	导线方案	极导线额定电流（A）	子导线20℃直流电阻（Ω/km）	子导线运行线温下的电阻（Ω/km）	单位长度电阻功率损失（kW/km）	千公里电阻损失率（%）
±500kV	葛—南	4×300	1200	0.0994	0.1064	76.61	6.38
	天—广	4×400	1800	0.0723	0.0786	127.33	7.07
	三—常	4×720	3000	0.03984	0.0440	198.00	6.60
±660kV	宁—东	4×1000	3030	0.0286	0.0315	144.60	3.62
±800kV	云—广	6×630	3125	0.0459	0.0496	161.46	3.23
	向—上	6×720	4000	0.03984	0.0436	232.53	3.63
	锦—苏	6×900	4500	0.0319	0.0349	235.58	3.27
	溪—浙	6×900	5000	0.0319	0.0352	293.33	3.67
	哈—郑	6×1000	5000	0.0286	0.0317	264.17	3.30
	酒—湖	6×1250	5000	0.02291	0.0250	208.33	2.60
	锡—泰	8×1250	6250	0.02291	0.0249	243.16	2.43

注 表中导线运行线温按环境气温为15℃、极导线额定电流计算。

二、电晕损失估算

直流线路坏天气时的电晕损失比好天气时增大不多，而坏天气在一年时间中所占的比重一般较小，其电晕损失只是全年电晕损失的一小部分，因此一般着重于计算好天气时的损失，在此基础上再乘上一个适当的系数，将坏天气时的损失增大因素考虑在内，从而粗略估算全年的电晕损失。

世界各国的研究机构对高压直流输电线路电晕损失进行了大量的试验研究，从而得到一系列有较好置信度的经验估算公式，如皮克公式、安乃堡公式、巴布科夫公式、IREQ 公式、意大利公式、EPRI 换算公式等。目前，根据国内科研成果和工程经验，安乃堡公式在我国是比较适用的。

1. 皮克公式

美国 EPRI 在皮克提出的交流线路电晕损失估算公式基础上进行修正，得到直流线路电晕损失估算公式，如式（4-17）。

$$P=\frac{K_{c1}}{\delta}\sqrt{\frac{r''}{s}}\left[U-(g_0 m_0 r'')\ln\left(\frac{s}{r''}\right)\right]^2\times 10^{-5} \tag{4-17}$$ [1]

式中 P——双极线路好天气下的电晕损失，kW/km；

U——极导线对地电压，kV；

K_{c1}——经验系数；

δ——大气校正系数；

s——极间距，cm；

g_0——导线起晕电场强度；

m_0——导线表面粗糙系数；

r''——导线等效半径，cm。

导线等效半径 r'' 可根据式（4-18）求取，该式是关于分裂导线与单根导线的电晕起始电压比值 K 与 r'' 的方程，而 K 可根据契柯捷耶夫公式式（4-19）～式（4-21）进行计算，相应导线布置见图 4-5。

$$K=\frac{r''\ln\frac{2H}{r''}}{r\ln\frac{2H}{r}} \tag{4-18}$$

二分裂导线（水平布置）$K=K_2$。

$$K_2=\frac{\ln\left[\frac{s^2}{rb}\cdot\frac{1}{1+(s/2H)^2}\right]}{\left(1+2\frac{r}{b}\right)\ln\left[\frac{s}{r}\cdot\frac{1}{\sqrt{1+(s/2H)^2}}\right]} \tag{4-19}$$

三分裂导线（正三角布置）$K=K_3$。

$$K_3=\frac{\ln\left\{\frac{s^3}{rb^2}\cdot\frac{1}{\left[1+(s/2H)^2\right]^{3/2}}\right\}}{\left(1+2\sqrt{3}\frac{r}{b}\right)\ln\left[\frac{s}{r}\cdot\frac{1}{\sqrt{1+(s/2H)^2}}\right]} \tag{4-20}$$

四分裂导线 $K=K_4$。

$$K_4=\frac{\ln\left\{\frac{s^4}{\sqrt{2}rb^3}\cdot\frac{1}{\left[1+(s/2H)^2\right]^2}\right\}}{\left(1+3\sqrt{2}\frac{r}{b}\right)\ln\left[\frac{s}{r}\cdot\frac{1}{\sqrt{1+(s/2H)^2}}\right]} \tag{4-21}$$

式中 H——导线对地高度，cm；

b——导线分裂间距，cm；

r——导线半径，cm。

[1] g_0、m_0 两项的数值决定起晕电场强度，在达拉斯试验中，观察到导线的起晕电场强度近似为 14kV/cm，使用皮克关于最大起晕电场强度的数值（g_0=29.8kV/cm），得到 m_0=0.47。

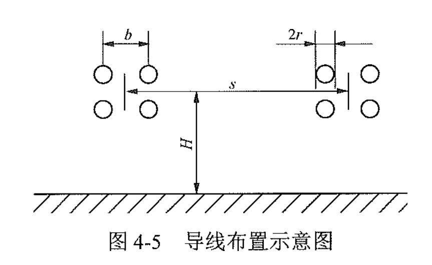


图 4-5 导线布置示意图

2. 安乃堡（Annebery）公式

安乃堡公式是根据瑞典的安乃堡试验工程所得到的数据，经过经验总结与理论分析而得出的，基本反映了线路各种参数、影响因素与电晕损失的关系。

（1）单极直流线路好天气下的电晕损失经验公式为

$$P = UK_{c2}nr \times 2^{0.25(g_{max}-g_0)} \times 10^{-3} \tag{4-22}$$

式中 P——单极直流线路的电晕损失，kW/km；

U——极导线对地电压，kV；

K_{c2}——导线表面系数，取 0.15（光滑导线）～0.35（有缺陷的导线）；

n——导线分裂数；

r——子导线半径，cm；

g_{max}——导线表面最大电场强度，kV/cm；

g_0——参考起晕电场强度，g_0=22δ，kV/cm；

δ——大气校正系数。

（2）双极直流线路好天气下的电晕损失经验公式为

$$P = 2U(K+1)\ K_{c2}nr \times 2^{0.25(g_{max}-g_0)} \times 10^{-3} \tag{4-23}$$

$$K = \frac{2}{\pi}\arctan\left(\frac{2H}{s}\right) \tag{4-24}$$

式中 P——双极直流线路的电晕损失，kW/km；

H——导线平均高度（对地最小距离 +1/3 弧垂），cm；

s——极间距，cm；

其他参数与式（4-22）中意义相同。

3. 巴布科夫（Popkov）公式

巴布科夫研究双极直流输电线路电晕理论，根据光滑导线在模拟条件下的试验结果，推导出电晕损失估算公式。经 EPRI 修正，得到经验公式为

$$P = 0.224U\left(\frac{U-U_0}{s}\right)^2 \tag{4-25}$$

式中 P——双极线路好天气下的电晕损失，kW/km；

U——极导线对地电压，kV；

U_0——对应起晕电场强度 14kV/cm 的导线电压，U_0=14U/g_{max}，kV；

g_{max}——导线表面最大电场强度，kV/cm；

s——极间距，cm。

4. IREQ 公式

加拿大魁北克水电局研究所（IREQ）经过大量的试验，得出的双极直流输电线路电晕损耗估算公式，见式（4-26）。该公式的适用范围为：电压为±600～±1200kV，分裂数为 4～6。

$$P_{dB} = P_0 + k_1(g_{max} - g_0) + k_2\lg\left(\frac{n}{n_0}\right) + 20\lg\left(\frac{d}{d_0}\right) \tag{4-26}$$

式中 P_{dB}——电晕损失，dB（以 1W/m 为基准）；

g_{max}——导线表面最大电场强度，kV/cm；

d——子导线直径，cm；

n——分裂导线的分裂数；

g_0、n_0、d_0——参照值，g_0 = 25kV/cm，n_0 = 6，d_0 = 4.064cm；

k_1、k_2、P_0——经验数据，由季节和天气条件决定，其具体数值见表 4-6。

式（4-26）中 P_{dB} 是以 dB 表示的电晕损失，而实际电晕损失 P 以 W/m 计量，两者的换算关系见式（4-27）。

$$P = 10^{\frac{P_{dB}}{10}} \tag{4-27}$$

表 4-6 IREQ 公式的参数取值

季节	天气条件	P_0（dB）	k_1	k_2
夏季	好	13.7	0.80	28.1
	坏	19.3	0.63	9.7
春、秋季	好	12.3	0.88	36.9
	坏	17.9	0.72	12.8
冬季	好	9.6	1.00	44.3
	坏	14.9	0.85	10.2

5. 意大利公式

意大利经过大量的试验，分别得出好天气和坏天气下的双极直流线路电晕损失估算公式，见式（4-28）、式（4-29）。该公式不考虑季节因素，适用范围为电压±150～±1200kV。

在好天气下为：

$$P_{dB} = P_0 + 50\lg\left(\frac{g_{max}}{g_0}\right) + 30\lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + 20\lg\left(\frac{n}{n_0}\right) - 10\lg\left(\frac{Hs}{H_0s_0}\right) \tag{4-28}$$

在坏天气下为：

$$P_{dB} = P_0 + 40\lg\left(\frac{g_{max}}{g_0}\right) + 20\lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + 15\lg\left(\frac{n}{n_0}\right) - 10\lg\left(\frac{Hs}{H_0s_0}\right) \tag{4-29}$$

式中 P_{dB}——电晕损失，dB（以 1W/m 为基准），换算关系同式（4-27）；

g_{max}——导线表面最大电场强度，kV/cm；

d——子导线直径，cm；

n——分裂导线的分裂数；

H——导线对地高度，m；

s——极间距，m；

g_0、n_0、d_0、H_0、s_0——参照值，g_0=25kV/cm，n_0=3，d_0=3.05cm，H_0=15m，s_0=15m；

P_0——经验常数，好天气下 P_0=2.9dB，坏天气下 P_0=11dB。

6. EPRI 换算公式

美国 EPRI 总结了美国 Dalles 试验中心试验线段上几种导线（1×61mm，2×40.6mm，2×46mm，4×30.5mm）的测量数据，提出两个可以同时考虑几种因素的换算公式，见式（4-30）和式（4-31）。

$$P_{dB}=P_0+56\lg\left(\frac{g}{g_0}\right)+20\lg\left(\frac{r'}{r_0'}\right) \tag{4-30}$$

$$P_{dB}=P_0+40\lg\left(\frac{g}{g_0}\right)+10\lg\left(\frac{r'}{r_0'}\right)+10\lg\left(\frac{n}{n_0}\right)+15\lg\left(\frac{s}{s_0}\right) \tag{4-31}$$

式中 P_{dB}、P_0——待求损失的导线的电晕损失和基准导线的电晕损失，dB（以 1W/m 为基准），换算关系同式（4-27）；

g、g_0——待求导线和基准导线的导线表面电场强度，kV/cm；

r'、r_0'——待求导线和基准导线的等效半径，mm；

n、n_0——待求导线和基准导线的分裂数；

s、s_0——待求线路和基准线路的极间距，m。

式（4-30）采用 2×40.6mm 导线作为基准导线时，估算结果准确度较高；采用其他试验导线作为基准导线时，不能得到较高的准确度。为提高电晕损失估算结果的准确度，EPRI 采用了另一种形式的换算公式，如式（4-31）所示。

7. 经验系数取值对电晕损失估算的影响

皮克公式的大气校正系数 δ 和经验系数 K_{c1}、安乃堡公式的经验系数 K_{c2} 等取值对电晕损失估算结果的准确性影响较大，为使电晕损失估算值更加准确，应选择合适的估算公式和经验系数。

EPRI 曾对各种方法的电晕损失估算结果与实测值进行过比较，结果列于表 4-7，表 4-8 列出了 EPRI 对一些经验系数的推荐值，三种估算公式在部分情况下的估算结果比较准确，EPRI 采用 x^2 检验法估计了经验公式的可信度，皮克公式和安乃堡公式的可信度较高。

表 4-7　采用 EPRI 经验系数的电晕损失估算值与实测值比较

导线结构（分裂根数×导线直径 mm）		1×61	1×61	2×46	2×46	2×46	4×30.5
极导线对地电压（kV）		±400	±400	±400	±500	±600	±600
极间距（cm）		1980	1050	1050	1830	1830	1120
实测结果（kW/km）		0.7	1.9	1.4	2.5	4.0	6.2
估算结果（kW/km）	皮克公式	0.6	1.3	1.02	1.9	4.31	6.75
	安乃堡公式	0.54	0.82	0.96	1.8	5.2	8.7
	巴布科夫公式	0.4	1.85	1.5	1.5	3.8	11.0

表 4-8　EPRI 的经验系数推荐取值

项目	皮克公式	安乃堡公式
经验系数	δ=1.04，K_{c1}=123	K_{c2}=0.20

中国电力科学研究院对葛—南直流工程试验线路电晕损失进行估算和实测，结果列于表 4-9，从表中可以看出，安乃堡公式的估算结果适用范围相对较广。

表 4-9　葛—南直流工程试验线路电晕损失估算值与实测值比较

公式	运行电压（kV）	±500	±450	±400	±350	±300	±250
	经验系数 \ 实测（W/m）	6.05	3.52	2.06	1.14	0.58	0.28
皮克公式	δ=1.04，K_{c1}=123*	3.38	2.17	1.23	0.55	0.144	0.0002
	δ=1，K_{c1}=211.7	6.05	3.89	2.22	0.99	0.26	0.00038
	δ=1，K_{c1}=206	5.89	3.79	2.14	0.96	0.25	0.00037
安乃堡公式	K_{c2}=0.20*	4.42	2.41	1.32	0.70	0.37	0.185
	K_{c2}=0.274	6.06	3.32	1.8	0.96	0.51	0.253
	K_{c2}=0.266	5.88	3.20	1.75	0.93	0.49	0.25
巴布科夫公式	—	3.63	2.10	1.06	0.42	0.093	0.00011

* EPRI 推荐的经验系数取值。

8. 典型单回双极直流线路的电晕损失

采用安乃堡公式，按表 4-10 给出的基本技术参数，计算好天气时，不同电压等级典型单回双极直流线路

在不同极间距情况下的电晕损失，如图 4-6 所示，图中符号 d 表示导线直径。

表 4-10　各种电压等级基本技术参数

电压等级	±400kV	±500kV	±660kV	±800kV	±1100kV
导线铝截面（mm^2）	300～500	400～900	720～1250	630～1250	800～1250
导线直径（mm）	23.9～30	27.6～40.6	36.2～47.9	33.8～47.9	38.4～47.9
分裂根数	4	4	4	6	8
导线分裂间距（mm）	450	450	500	500	550
极间距（m）	11	13	18	20	26
导线高度（m）	15	17	21	23	31

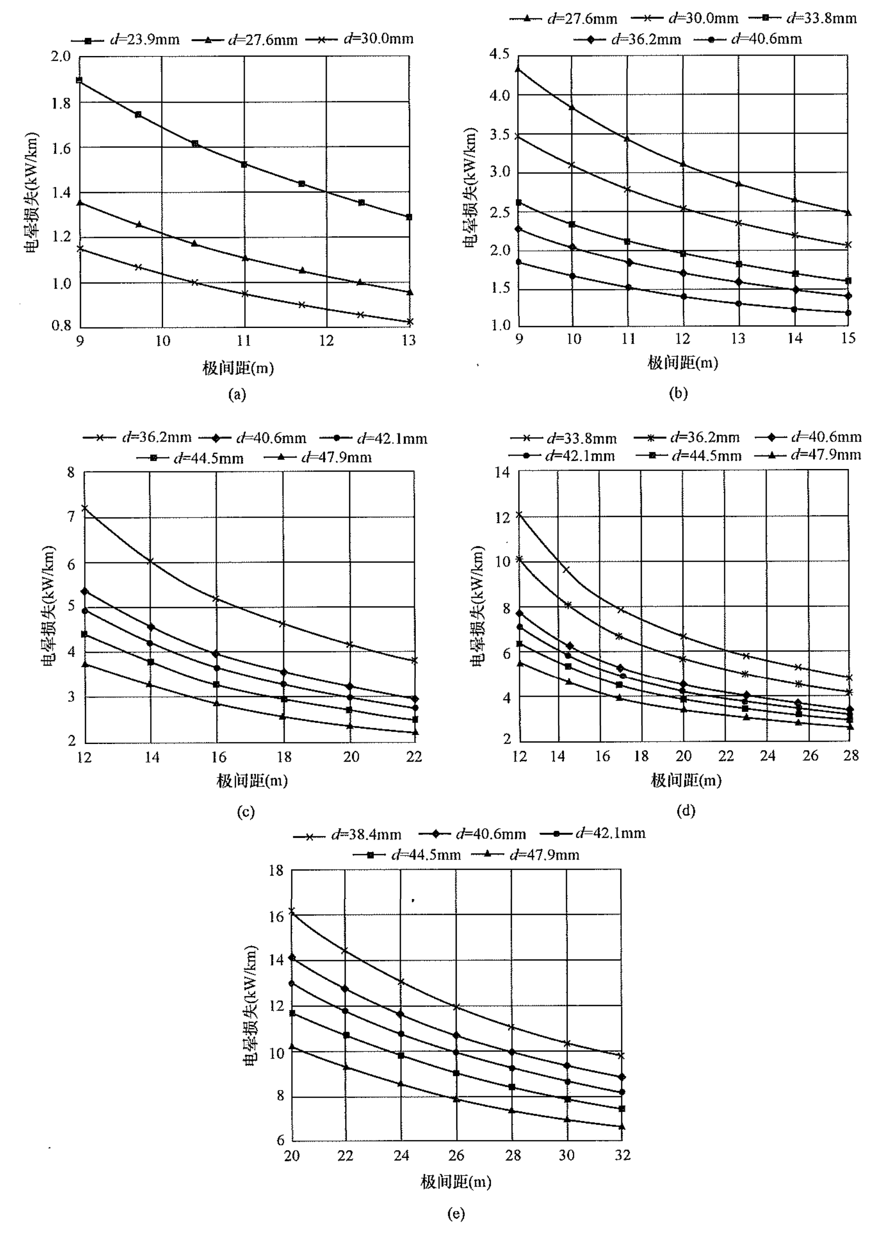


图 4-6　单回双极直流线路不同极间距情况时导线电晕损失

（a）±400kV 直流线路；（b）±500kV 直流线路；（c）±660kV 直流线路；（d）±800kV 直流线路；（e）±1100kV 直流线路

由图 4-6 可知，导线电晕损失随着极间距和导线直径的增大而减小。

上述计算中，未考虑海拔对直流线路电晕损失的影响。目前，电晕损失估算公式中皮克公式可以考虑大气校正系数，即海拔因素，其他估算公式未考虑海拔因素，设计时应考虑海拔因素对电晕损失计算的影响，相关科研单位正在针对海拔高度与直流线路电晕损失的关系进行深入研究。

三、电能损失计算

线路的电能损失与线路电阻、线路长度、极电流及其持续时间有关。对交流系统而言，如果线路中输送的功率一直保持为最大负荷功率，在 τ 小时内的损耗恰好等于线路全年的实际损耗，则 τ 称为最大负荷损耗小时数。直流输电线路仍可沿用“最大负荷损耗小时数”的概念，但需注意直流系统的额定负荷对应于交流系统的最大负荷。直流工程的最大负荷损耗小时数与最大负荷利用小时相关，可参考交流电网功率因数为 1 时的最大负荷利用小时数与损耗小时数的关系确定。

直流输电线路单位长度的年电能损失可按式（4-32）计算：

$$\Delta A = \Delta P_d \tau + \Delta P_c t_0 \qquad (4\text{-}32)$$

式中 ΔA ——直流线路单位长度的年电能损失，kWh/km；

ΔP_d ——直流输电线路单位长度的电阻功率损失，kW/km；

ΔP_c ——直流输电线路单位长度的电晕功率损失，kW/km；

τ ——最大负荷损耗小时数，h；

t_0 ——年运行小时数，为系统年实际带电时间，h。

根据式（4-32），计算得到±500kV～±800kV 典型直流线路单位长度的年电能损失，见表 4-11。

表 4-11 典型双极直流线路单位长度的年电能损失计算结果

电压等级	导线方案	极导线额定电流（A）	最大负荷损耗小时数（h）	单位长度电阻年电能损失（×10³ kWh/km）	单位长度电晕年电能损失（×10³ kWh/km）	单位长度年电能损失（×10³ kWh/km）
±500kV	4×300	1200	4500	344.7	38.2	382.9
	4×400	1800	4500	573.0	25.3	598.3
	4×720	3000	4500	891.0	14.0	905.0
±660kV	4×1000	3030	6000	867.8	26.8	894.4
±800kV	6×630	3125	4500	726.6	55.3	781.9
	6×720	4000	4500	1046.4	47.5	1093.9
	6×900	4500	4500	1060.1	39.4	1099.4
	6×900	5000	4500	1320.0	39.4	1359.4
	6×1000	5000	6000	1585.0	35.9	1620.9
	6×1250	5000	5000	1041.7	30.1	1071.8
	8×1250	6250	5000	1215.8	23.3	1239.1

注 1. 系统年实际带电时间按 8500h 估算。
2. 最大负荷损耗小时数由最大负荷利用小时数估算。

第四节 电场效应

一、电场效应原理及特点

导线发生电晕放电后，极导线间、极导线与大地间的整个空间均充满带电离子（电荷）。这些空间电荷将产生直流输电线路所特有的一些效应，空间电荷本身产生电场，它将大大加强由导线电荷产生的电场；同时空间电荷在电场作用下运动，形成离子流。

直流输电线路合成电场由两部分电场向量叠加：一部分由导线所带电荷产生，这种场与导线排列的几何位置有关，与导线的电压成正比，通常称之为静电场或标称电场；另一部分由空间电荷产生。合成电场强度单位为 kV/m，合成电场强度的大小主要取决于导线电晕放电的严重程度，最大合成电场强度有可能比标称电场强度大很多，可达 3～5 倍。

图 4-7 给出±500kV 直流试验线路下合成和标称电场的分布图，该试验线路极导线为 4×LGJQ-300，极间距为 14m，极导线对地距离为 12.5m。图 4-7 中曲

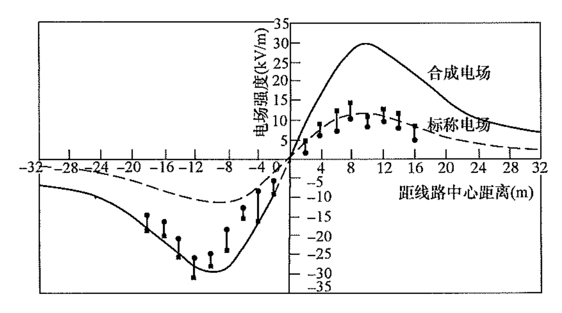


图 4-7 ±500kV 直流试验线路合成电场分布图

线为计算值，短直线为实测值的变化范围。合成电场强度的最大值出现在极导线外侧 2m 附近，合成电场强度的最小值为 0，一般出现在两极导线的中心。

直流输电线路线下的合成电场与交流线路下的电场性质不同，在相同的电场强度值下两者产生的效应也是不同的，因此在比较交直流输电线路电场强度时，不能简单地将直流线路的合成电场强度与交流线路进行数值比较。

导线电晕时，电离形成的离子在电场力的作用下，向空间运动形成离子流，地面单位面积截获的离子流称为离子流密度，单位为 nA/m^2。离子在单位电场强度作用下的迁移速率，称为离子迁移率，用（cm/s）/（V/cm）表示。直流线路负离子的迁移率[1.8（cm/s）/（V/cm）]大于正离子[1.4（cm/s）/（V/cm）]，因此负离子流密度大于正离子流密度。图 4-8 给出±500kV 直流试验线路下离子流密度的分布图，曲线为计算值，短直线为实测值的变化范围。

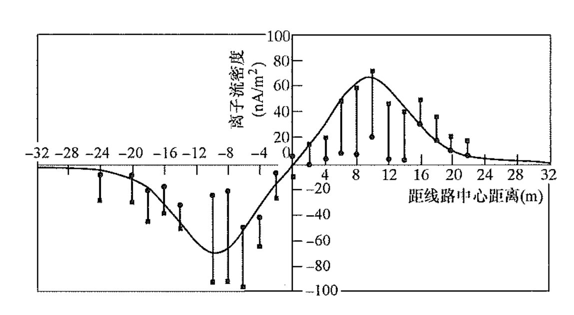


图 4-8 ±500kV 直流试验线路离子流密度分布图

图 4-7 和图 4-8 中合成电场强度和离子流密度的分布是无风时最为理想的情况，实际上正负离子在电场下的迁移速度与风速有关，即使是很小的风（如风速 1m/s）也将使合成电场分布发生畸变。另外，垂直线路方向的风，将使合成电场强度的最大值向顺风方向移动，风速稍大就会使合成电场分布发生严重畸变。

二、人在直流输电线下的感受

直流电场对人的作用主要是使人体表面产生感应电荷，其效应主要是感应电荷与皮肤相互作用的直接感受和电荷放电给人带来的刺痛感。人在直流输电线下的感受主要有直接感受、截获离子流时的感受和暂态电击等感受，现将相关研究结论分述如下。

1. 直接感受

与交流线路不同，在正常运行的直流线路下，基本没有电场变化产生位移电流的现象。人暴露在直流电场中，在体表会产生感应电荷。由于感应电荷的存在，人体内部的合成电场强度几乎为零，直流电场对人体内部几乎没有影响。人体表面产生的感应电荷达到一定程度后，与皮肤作用，会对皮肤产生刺激感，即直接感受。

美国在直流线路下进行的直接感受试验表明，对穿普通鞋的人，当合成电场强度为 30kV/m 时，毛发和皮肤才开始出现刺激感。国际非电离辐射防护委员会（ICNIRP）指出，对于大多数人，在 25kV/m 的合成电场强度下不会发生因表面电荷引起烦恼的感觉。苏联在研究直流电场效应后认为，直流线路下的允许合成电场强度可达 50kV/m。世界卫生组织报道了志愿者在模拟直流线路下的直接感受试验，在无离子和存在高密度离子流的条件下，出现刺激感的平均直流合成电场强度分别为 45.1kV/m 和 36.9kV/m。

我国在直流线路下进行的人体直接感受试验表明：毛发和皮肤对直流电场最敏感。在地面合成电场强度低于 30kV/m 的地方，皮肤感觉不明显；当地面合成电场强度高于 30kV/m 时，外露皮肤的刺激感才逐步增强，离开高场强区后，皮肤刺激感立即消失，无任何不适反应。

2. 人体截获离子时的感受

人在直流线路下会截获离子，被截获的离子通过人体流入大地。研究表明：要得到同样的感受，流过人体的直流电流要比交流电流大 5 倍以上；而人在直流线路下截获的离子电流又比感受的临界值小 2 个数量级。因此，人在直流线路下截获离子一般不会有感觉。

3. 暂态电击感受

在直流电场中，人的体表会产生感应电荷，当人接触接地金属体时，电荷会通过接地体放电。直流电场中的离子遇到对地绝缘体，将附着在该物体上使其带电，当人接触该物体时，电荷也可能通过人体流入大地。

以上的放电过程短暂，人体往往会有刺痛感，即暂态电击。放电时产生的刺痛感程度与放电量、电场强度以及人体或物体对地绝缘水平有关，可以分为可感知、恼人和疼痛几个等级。

由于人与人之间的个体差异，每个人发出可感知放电的直流合成电场强度的最小值不同，世界卫生组织（WHO）对此进行过总结，范围为 10～45kV/m。每个人发生恼人和疼痛放电的直流电场强度的最小值也不同，疼痛放电一般只会在以下情况发生：对地绝缘的人接触接地导体，或接地良好的人体接触对地绝缘的金属体。可见，具备必要的条件才会发生疼痛放电。

我国在直流线路下的暂态电击试验表明：当人在地面合成电场强度为 12～26kV/m 的地方触摸停留的大型车辆时，均无感觉。在地面合成电场强度为 6.1～15.1kV/m 时，穿普通鞋的人接触接地金属体、人接触接地金属线的同时触摸空中对地绝缘的金属线以及人

打伞在线下行走时均无感觉。考虑极端情况，人打伞触摸金属柄，同时接触接地金属线时，试验结果为：地面合成电场强度小于 9.6kV/m 时，无感觉；地面合成电场强度为 11～13kV/m 时，有轻微感觉；地面合成电场强度为 14.6～15.1kV/m 时，放电与人触摸水龙头的感觉类似，但强度要小；直到达到 32.4kV/m，所发生的暂态电击类似人触摸水龙头的放电。这些基本上都属于可感知放电。

世界卫生组织（WHO）2004 年总结了直流电场对人体影响的研究，没有任何试验结果表明，曝露于直流电场会对人体的健康产生有害、慢性的或迟发性的不利影响。

三、合成电场与离子流密度的限值

直流输电线路电场效应的限值用合成电场强度和离子流密度的限值表示，合理的限值标准，既考虑人在线下的感受，满足生物效应的要求，又避免增加不必要的线路建设投资，使输电线路的造价控制在合理的水平。

GB 50790—2013《±800kV 直流架空输电线路设计规范》和 DL 5497—2015《高压直流架空输电线路设计技术规程》规定我国直流输电线路地面合成电场强度、离子流密度限值如下：

（1）对于一般非居民地区（如跨越农田），合成场强限定在雨天 36kV/m，晴天 30kV/m，离子流密度限定在雨天 150nA/m²，晴天 100nA/m²。

（2）对于居民区，合成场强限定在雨天 30kV/m，晴天 25kV/m，离子流密度限定在雨天 100nA/m²，晴天 80nA/m²。

（3）对于人烟稀少的非农业耕作地区，合成场强限定在雨天 42kV/m，晴天 35kV/m，离子流密度限定在雨天 180nA/m²，晴天 150nA/m²。

线路邻近民房时，房屋所在地面湿导线情况下未畸变合成电场强度限值为 15kV/m。该限值主要考虑减少电击对人造成的不适或不快感，以 25kV/m（晴天）作为邻近民房的最大合成场强，同时按 80%测量值不超过 15kV/m 考虑。直流输电线路 80%测量值不超过 15kV/m 是指：假设测量数据为 100 组，将测量结果按照由小到大的顺序排列，第 81 个数值，即 80%测量值，此时小于或等于 15kV/m 为满足要求。

四、合成电场与离子流密度测量

1. 测量要求及测量仪器布置

由于影响直流线路导线电晕放电的因素很多，产生的空间带电离子的运动变化很大，因此合成电场和离子流的分布也将随之改变。要了解、掌握直流线路运行时合成电场与离子流密度的情况，需要进行长期的、多时段的测量和统计分析。

DL/T 1089—2008《直流换流站与线路合成场强、离子流密度测量方法》规定直流输电线路合成电场强度和离子流密度的测量仪器和方法。

地面合成电场强度、离子流密度的测量应在风速小于 2m/s、无雨、无雾、无雪的好天气下进行，测量的时间段不少于 30min。测量合成电场强度和离子流密度时，测量仪表应直接放置在地面上（探头与地面间的距离应小于 200mm），接地板应良好接地。

测量直流输电线路地面合成电场强度和离子流密度时，测量地点应选在地势平坦，远离树木杂草，没有其他电力线路、通信线路及广播线路的空地上。测量仪应与测量人员保持足够远的距离（至少 2.5m），避免产生较大的电场畸变，或影响离子流的分布；与固定物体的距离应该不小于 1m，以减小固定物体对测量值的影响。

直流输电线路的合成电场强度和离子流密度通常需要多套仪器同时测量，一般是在直流输电线路档距中央，垂直线路方向每隔一定距离放置一台旋转电场仪和离子流密度测量板。若要全面给出直流线路下合成电场和离子电流分布，一般需同时放置 20 余套测量设备，图 4-9 和图 4-10 给出了典型的布置示意图。

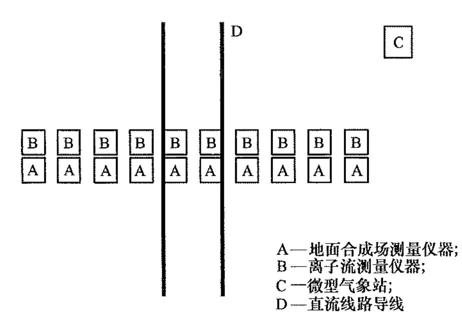


图 4-9 典型测量布置示意图

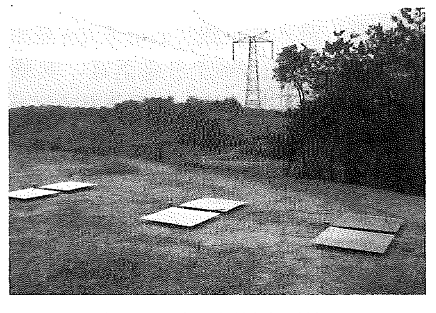


图 4-10 实际测量布置情况

2. 合成电场测量原理

测量直流输电线路线下的合成电场，需要用特制的旋转电场仪，该电场仪一方面要能准确测量直流合成电场强度，另一方面又能把截获的离子电流泄流入地，并尽量小地影响正常读数。该电场仪器探头是每

隔一定角度开有若干个扇形孔的两个圆片组成，两圆片同轴安置，两者间隔开一定距离并相互绝缘，上面圆片随轴转动并直接接地，下面圆片固定不动并通过一电阻接地。图 4-11 给出了旋转电场仪测量原理示意图。当动片转动时，直流电场通过转动圆片上的扇形孔，时而作用于定片上，时而又被屏蔽。这样在定片和地之间产生一交变的电流信号。该电流信号与被测直流电场强度成正比，通过测量该交变的电流可以知道直流电场强度的大小，可以用数学说明如下。

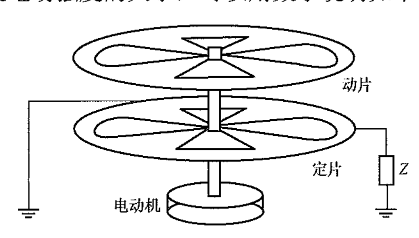


图 4-11　旋转电场仪测量原理示意图

假设圆片上共有 n 个扇形孔，每个扇形孔面积为 A_0，上面圆片转动的角速度为 ω，则当上圆片转动时下面圆片曝露于直流电场的总面积 A 随时间变化为

$$A(t)=nA_0(1-\cos n\omega t) \tag{4-33}$$

若被测直流合成电场的电场强度为 E，空气的介电系数为 ε_0，则定片上感应的电荷 $Q(t)$ 为

$$Q(t)=\varepsilon_0 EA(t) \tag{4-34}$$

可以求得，由直流电场感应的电流为

$$i_e(t)=\frac{dQ(t)}{dt}=\varepsilon_0 En^2A_0\omega\sin n\omega t \tag{4-35}$$

通过测量 $i_e(t)$ 可以得到合成电场强度 E。

需要指出的是，沿电力线移动的离子电流，也通过转动圆片上的扇形孔进入定片，若离子电流密度为 J，则进入到下面固定圆片的离子电流为

$$i_j(t)=JA(t)=nA_0J(1-\cos n\omega t) \tag{4-36}$$

由此可见，进入固定圆片的电流 $i(t)$ 是由离子电流 $i_j(t)$ 和感应电流 $i_e(t)$ 两个分量组成，其感应电流 $i_e(t)$ 和 $i_j(t)$ 相角正好差 90°。如果能准确区分和测量 $i_e(t)$ 和 $i_j(t)$ 两个分量，利用该仪器可同时用来测量合成电场强度 E 和离子电流密度 J，但由于旋转电场仪的 A 值小，致使 $i_j(t)$ 很小，无法由此准确求得 J 值。由于 $i_j(t)\ll i_e(t)$，$i_j(t)$ 的存在对 $i_e(t)$ 读数影响小，即 $i(t)\approx i_e(t)$，故可以由此确定合成电场强度 E 值。

3. 离子流密度测量原理

离子流密度可通过测量对地绝缘的金属板截获的电流来测量，测量方法主要有两种：一种方法是将金属板通过一个能测量微弱电流的电流表接地，直接测量电流，目前市面出售的数字精密弱电流表的内阻约 1kΩ（实际上是通过测 1kΩ上的压降来读数的）；另一种方法是将金属板与地间并联一个电阻，通过测量该电阻上的压降，来推算出流过的电流。并联的电阻在精密数字电压表能读数的条件下，应尽可能地小，若阻值过大，被金属板接受的离子电荷不能很快释放，会导致读数误差，该电阻可以是 1kΩ或 1～10kΩ。

五、合成电场强度与离子流密度计算方法

随着输送容量的不断提高，直流线路导线截面也越来越大。当导线截面较大时，导线表面电场强度可能小于或等于起晕电场强度，相关科研单位对这种情况正在进行深入计算研究。本章关于合成电场强度、离子流密度等电磁环境指标的计算方法主要适用于导线表面电场强度大于起晕电场强度的情况。

合成电场强度 E_s，空间电荷密度 ρ 和离子流密度 J 的基本方程为：

$$\nabla\cdot E_s=-\rho/\varepsilon_0 \tag{4-37}$$

$$J=K\rho E_s \tag{4-38}$$

$$\nabla\cdot J=0 \tag{4-39}$$

基于上述基本方程，直流线路地面合成电场强度与离子流密度的计算方法可大致分为半经验公式法、解析法、有限元法和 BPA 法。

在下述各计算方法中规定所用的符号及含义为：

E ——无空间电荷时地面电场强度，即标称电场强度，kV/m；

E_s ——空间电荷存在时地面合成电场强度，kV/m；

ρ、ρ_+、ρ_- ——空间电荷密度、正空间电荷密度、负空间电荷密度，C/m²；

ρ_1 ——导线表面的电荷密度，C/m²；

J、J_+、J_- ——离子流密度、正离子流密度、负离子流密度，nA/m²；

φ ——无空间电荷时空间某点的电位，kV；

φ_s ——有空间电荷时空间某点的合成电位，kV；

φ_e ——空间电荷在空间某点产生的电位，kV；

A ——有空间电荷时场强与无空间电荷时场强的比值，即 E_S/E；

A_1 ——导线表面的 E_S/E；

ε_0 ——真空介电常数，即 8.854×10^{-12}F/m；

K、K_+、K_- ——离子迁移率、正离子的迁移率、负离子的迁移率，cm²/（V・s）；

r ——离子的复合系数；

v_+、v_- ——正、负离子的运动速度矢量，m/s；

w ——风速矢量，m/s。

（一）EPRI 半经验公式法

美国 EPRI 在直流输电线路缩比模型上进行大量模拟试验，研究地面合成电场强度和离子流密度与线路基本参数间的关系，在此基础上提出一种半经验公式法。

1. 基本思路

EPRI 定义了饱和电晕的概念，认为饱和电晕时导线上的电荷为零，电荷全部分布于空间大气中，且此时导线对地电压数倍于导线起晕电压。

EPRI 半经验公式法认为，直流输电线下的电场有两种极限情况。一种是没有电晕时，仅由导线上电荷决定的静电场（或称标称电场）；另一种是饱和电晕时仅由空间电荷决定的电场，此时电晕已发展得相当严重，线下电场仅取决于极间距和导线高度，导线本身尺寸已不影响线下电场。计算实际线路下的空间电场和离子流密度分布时，首先计算出上述两种极限情况的电场分布和离子电流密度分布，再依照未饱和电晕放电程度，参考试验得到的曲线插值计算出实际情况下合成电场和离子流密度的分布。

2. EPRI 的试验成果

（1）饱和电晕时地面电场强度及离子流密度的横向分布规律。

饱和电晕时，地面电场强度及离子流密度的横向分布与极间距（s）、导线高度（H）及距线路中心线的距离（x）有关。

以 $\frac{x}{H}$ 为横坐标，$F(x)=\frac{E_D \bullet H}{U}$ 为纵坐标，不同 $\frac{s}{H}$ 值所对应的地面归一化电场强度的横向分布规律如图 4-12 所示。其中，E_D 为饱和电晕时地面电场强度，U 为极导线对地电压。

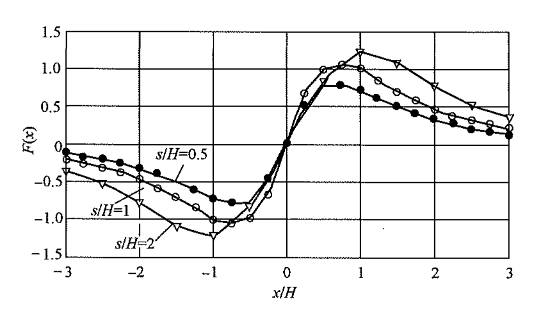


图 4-12 地面归一化电场强度的横向分布

饱和电晕时地面电场强度的最大值 $E_{D\max}$ 按式（4-40）计算：

$$E_{D\max}=1.31(1-e^{-1.7s/H})\bullet\frac{U}{H} \tag{4-40}$$

以 $\frac{x}{H}$ 为横坐标，$C(x)=\frac{J_D \bullet H^3}{U^2}$ 为纵坐标，不同 $\frac{s}{H}$ 值所对应的地面归一化离子流密度的横向分布规律如图 4-13 所示。其中，J_D 为饱和电晕时离子流密度。

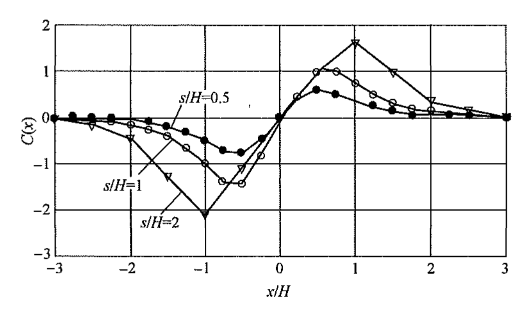


图 4-13 地面归一化离子流密度的横向分布

饱和电晕时地面正、负离子流密度的最大值 $J_{D+\max}$ 和 $J_{D-\max}$ 可按以下两式计算：

$$J_{D+\max}=1.65\times10^{-15}(1-e^{-0.7s/H})\bullet\frac{U^2}{H^3} \tag{4-41}$$

$$J_{D-\max}=-2.15\times10^{-15}(1-e^{-0.7s/H})\bullet\frac{U^2}{H^3} \tag{4-42}$$

（2）未饱和电晕时地面电场强度及离子流密度的幅值变化规律。

未饱和电晕时地面电场强度及离子流密度的幅值与极导线对地电压（U）、导线电晕起始电压（U_0）、导线高度（H）及分裂导线等效直径 d_{eq} 有关。

引入修正系数 $K_e=f\left(\frac{U}{U_0}\right)$ 表示未饱和电晕时与饱和电晕时的地面电场强度间的关系，以 $\frac{U}{U_0}$ 为横坐标，K_e 为纵坐标，不同 $\frac{H}{d_{eq}}$ 值所对应的起晕后地面电场强度计算的设计曲线如图 4-14 所示。

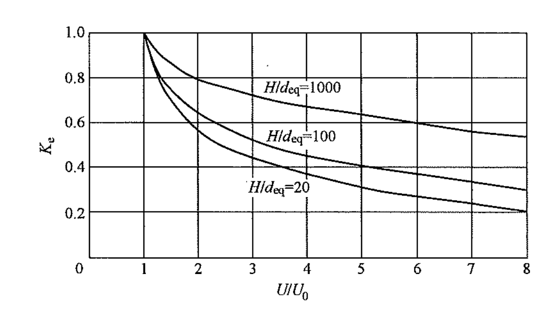


图 4-14 起晕后地面电场强度计算的设计曲线

引入修正系数 $K_i=f\left(\frac{U}{U_0}\right)$ 表示未饱和电晕时与饱和电晕时的地面离子流密度间的关系，以 $\frac{U}{U_0}$ 为横

坐标，K_i 为纵坐标，不同 $\frac{H}{d_{eq}}$ 值所对应的起晕后地面离子流密度计算的设计曲线如图 4-15 所示。

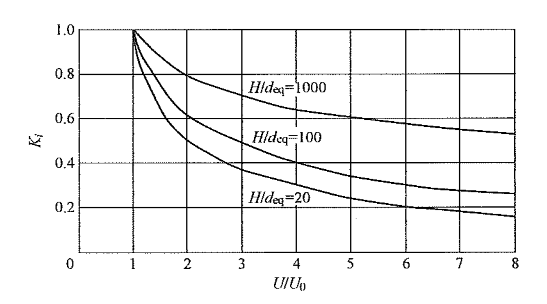


图 4-15　起晕后地面离子流密度计算的设计曲线

3. 地面合成电场强度和离子流密度的计算步骤

直流输电线路的地面合成电场强度和离子流密度计算步骤如下：

（1）计算地面标称电场强度。

无空间电荷存在时，仅由导线上电荷产生的地面标称电场强度 E 可按式（4-43）计算。

$$E=\frac{2UH}{\ln\frac{4H}{d_{eq}}-\frac{1}{2}\ln\frac{4H^2+s^2}{s^2}}\left[\frac{1}{H^2+\left(x-\frac{s}{2}\right)^2}-\frac{1}{H^2+\left(x+\frac{s}{2}\right)^2}\right] \tag{4-43}$$

式中　d_{eq}——分裂导线等效直径，m。$d_{eq}=D\sqrt[n]{\frac{nd}{D}}$，其中 D 为通过 n 根子导线中心的圆周直径，m。

（2）计算导线起始电晕电压。

计算出各分裂导线表面最大电场强度 g_{max}，通过皮克公式计算出导线的电晕起始电场强度 g_0，再采用式（4-44）得到导线起始电晕电压 U_0。

$$U_0=U\cdot\frac{g_0}{g_{max}} \tag{4-44}$$

式中　g_0——导线起晕电场强度，kV/cm；

g_{max}——导线表面最大电场强度，kV/cm。

（3）计算地面合成电场强度。

有空间电荷后地面某点的合成电场强度 E_s 可按式（4-45）求得：

$$E_s=\frac{U}{H}F(x)\left\{1-\left[K_e\cdot\frac{U_0}{U}\cdot\left(1-\frac{E\cdot H}{U\cdot F(x)}\right)\right]\right\} \tag{4-45}$$

式(4-45)中的 K_e 由图 4-14 查曲线插值计算求得。在线路走廊及附近（$-3H\leqslant x\leqslant 3H$），式（4-45）中的 $F(x)$ 由图 4-12 查曲线插值计算求得，在线路走廊以外 $\left(1<\frac{x-s/2}{H}<4\right)$，$F(x)$ 按 $F(x)=\frac{E_D\cdot H}{U}$ 求取，其中 E_D 按式（4-46）进行计算。

$$E_D=1.46(1-e^{-2.5s/H})\cdot e^{-0.7(x-s/2)/H}\cdot\frac{U}{H} \tag{4-46}$$

（4）计算地面离子电流密度。

地面某点的离子电流密度可按式（4-47）求得：

$$J=\frac{U^2}{H^3}C(x)\left\{1-K_i\cdot\frac{U_0}{U}\cdot\left[1-\left(1-\frac{U_0}{U}\right)^2\right]\right\} \tag{4-47}$$

式(4-47)中的 K_i 由图 4-15 查曲线插值计算求得。在线路走廊及附近（$-3H\leqslant x\leqslant 3H$），式（4-47）中的 $C(x)$ 由图 4-13 查曲线插值计算求得，在线路走廊以外 $\left(1<\frac{x-s/2}{H}<4\right)$，$C(x)$ 按 $C(x)=\frac{J_D\cdot H^3}{U^2}$ 求取，其中饱和电晕时正、负离子流密度 J_{D+}、J_{D-} 分别按式（4-48）和式（4-49）进行计算。

$$J_{D+}=1.54\times10^{-15}(1-e^{-s/H})\cdot e^{-1.75(x-s/2)/H}\cdot\frac{U^2}{H^3} \tag{4-48}$$

$$J_{D-}=-2.0\times10^{-15}(1-e^{-1.5s/H})\cdot e^{-1.75(x-s/2)/H}\cdot\frac{U^2}{H^3} \tag{4-49}$$

4. 计算流程图

采用半经验公式法计算地面合成场强和离子电流密度的流程如图 4-16 所示。

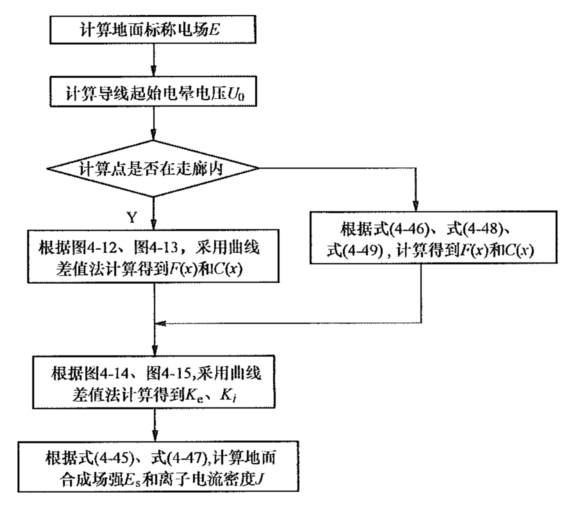


图 4-16　半经验公式法计算流程图

（二）解析法

由于基本方程式（4-37）～式（4-39）所描述的有空间电荷的合成电场方程是非线性的，这种合成电场方程无法直接求解。在前人工作的基础上，Sarma 等人进一步完善了采用 Deutsch 假设的计算方法，认

为空间电荷不影响场的方向，仅影响其大小，从而把复杂的二维场问题转为沿电力线求解一维非线性微分方程组的边界值问题，这种计算方法称为解析法。下面简述 Sarma 等人的解析计算方法。

1. 假设条件

（1）空间电荷只影响场强幅值而不影响其方向，即 Deutsch 假设

$$E_s = AE \tag{4-50}$$

式中 A——标量函数。

（2）导线表面附近发生电离后，导线表面场强保持在起晕场强值，即 Kaptzov 假设。

（3）正、负极导线起晕电压相等。

（4）不考虑离子的扩散作用。

（5）双极线路下正、负离子迁移率相同。

（6）离子迁移率与电场强度无关，是一个常数。

2. 计算步骤

求取无空间电荷时标称电场强度 E，然后根据式（4-50），只要求得 A，即可求得 E_s。

根据基本方程式（4-37）～式（4-39）和假设条件，经过推导可得

$$A^2 = A_1^2 + \frac{2\rho_1 A_1}{\varepsilon_0}\int_{\varphi}^{U}\frac{d\varphi}{E^2} \tag{4-51}$$

$$\frac{1}{\rho^2} = \frac{1}{\rho_1^2} + \frac{2}{\varepsilon_0 \rho_1 A_1}\int_{\varphi}^{U}\frac{d\varphi}{E^2} \tag{4-52}$$

求解导线表面的电荷密度ρ_1可用迭代法，但若ρ_1初值选择不当，可能会不收敛。为此，Sarma 等提出一个寻找初值的公式

$$\rho_m = \frac{\varepsilon_0 (U - U_0)}{\int_{\varphi}^{U}\int_{\varphi}^{U}\frac{d\eta}{E^2}d\varphi} \tag{4-53}$$

式中 η——电位变量。

通过平均电荷密度 ρ_m，可以较好地选取 ρ_1 的初值。

解式（4-52）和式（4-53），求得沿无空间电荷的电场线上的 A 和 ρ 值后，便可算出合成电场强度 E_s 和离子流密度 J。

（三）有限元法

有限元法就是将整个区域分割成许多很小的子区域求解每个小区域，这些子区域通常被称为“单元”或者“有限元”，将求解边界问题的原理应用于这些子区域中，求解每个小区域，从而得到整个区域的解。

计算中先将求解区域划分成许多三角形单元，然后设置三角形节点处的电荷密度为一初始值，再利用描述直流线路的方程式（4-54）及式（4-55）计算得到空间电场强度及电位，由电场强度得到新的电荷密度分布，根据新的电荷密度分布计算出合成电场强度 E_s 及电位 φ。若该计算结果满足精度要求及边界条件，则该数值解为最终计算结果，否则改变初始电荷分布（改变电荷初值或细化单元）再次计算，直到满足条件。

根据离子流场的实际情况，为了简化问题，并保证计算结果的可信度，需要采用上一节所提到的假设(2)及假设(6)，有限元法的特点是不需要采用 Deutsch 假设。

具体计算步骤如下：

（1）将导线及求解域进行有限元剖分，剖分的单元一般采用三角形，如图 4-17 所示。为满足计算精度，一般将导线表面附近的单元进行细化处理。剖分完成后，先假定空间剖分单元各节点的电荷密度为某一初值，计算各节点的电位和电场强度。

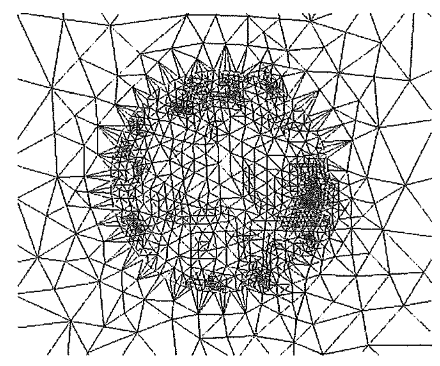


图 4-17 导线及求解域有限元剖分

描述双极直流输电线路合成电场的方程可表达为：

$$\nabla^2\varphi = -(\rho_+ - \rho_-)/\varepsilon_0 \tag{4-54}$$

$$E_s = -\nabla\varphi \tag{4-55}$$

（2）根据各节点的电场强度，由电流连续性方程式（4-58）～式（4-61）计算各节点的空间电荷密度。

直流输电线路电晕产生的正、负离子的运动速度主要受在电场力作用下的离子迁移、离子扩散和风速这 3 个因素的影响。忽略离子扩散的影响后，正、负离子的运动速度矢量分别可表示为

$$v_+ = K_+ E_s + w \tag{4-56}$$

$$v_- = -K_- E_s + w \tag{4-57}$$

双极直流输电线路电流连续方程如下：

$$J_+ = \rho_+ v_+ \tag{4-58}$$

$$J_- = \rho_- v_- \tag{4-59}$$

$$\nabla \cdot J_+ = -r\rho_+\rho_- / e \tag{4-60}$$

$$\nabla \cdot J_- = r\rho_+\rho_- / e \tag{4-61}$$

式中 e——电子电荷量。

（3）根据新的空间电荷密度采用式（4-54）与式（4-55）进行迭代计算，求新的电位与电场强度，直到空间各点的电位和电场强度的计算结果在一定误差范

围内同时满足原微分方程和边界条件，这个计算结果就为所求的数值解。这样就获得了整个求解区域内所有单元节点处的空间电荷密度，通过空间电荷密度则可算出合成电场强度 E_s。

（四）BPA 法

美国邦纳维尔电力局（Bonneville Power Administration）的 S. Harrington 和 R. Kelley 提出一种直流输电线路的地面合成场强和离子流密度的 BPA 简化算法，并开发了可以公用的计算机程序 ANYPOLE。BPA 法采用数值算法，在 Deutsch 假设等基本假设的前提下，引入高斯力线管的概念，对偏微分方程组进行简化处理，将其转化为便于求解的一维积分方程。高斯力线管的一个端面在导线上，侧面沿电力线，另一端面垂直于电场。通过沿着无电晕的电力线进行线积分，求解电场强度和离子流密度。

基于假设条件，可以获得计算所需的通量管，单根通量管示意图如图 4-18 所示。

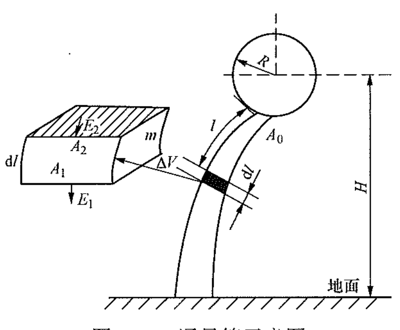


图 4-18　通量管示意图

图 4-18 中所示通量管，起始于导线表面，两边沿着电力线，终端截面垂直于场强方向。图 4-18 中，H 为导线对地高度，R 为导线半径，A_2 和 E_{s2} 分别为沿着电力线方向，距离导线表面 l 处的通量管截面边长和场强；A_1 和 E_{s1} 为 l+dl 处的通量管界面边长和场强；m 为单位厚度；ΔV 为 dl 范围内通量管微元的体积。

根据高斯通量定理，可得到合成电场强度和电荷密度为：

$$E_s(l)=\left(\partial\int_0^L\frac{1}{E(l)}\mathrm{d}l+\frac{E_0^2}{E(0)^2}\right)^{\frac{1}{2}}E(l) \qquad (4\text{-}62)$$

$$\rho(l)=\frac{\partial\varepsilon_0E(l)}{2E_s(l)} \qquad (4\text{-}63)$$

式中　$E_s(l)$——沿电力线方向，距离导线表面 l 处的合成电场强度，V/m；

$E(l)$——沿电力线方向，距离导线表面 l 处的标称电场强度，V/m；

$\rho(l)$——沿电力线方向，距离导线表面 l 处的电荷密度，C/m^2；

E_0——导线起晕电场强度，V/m；

∂——计算因子，$\partial=\dfrac{2J(0)}{\varepsilon_0KE(0)}$；

$J(0)$——导线表面处的离子流密度，A/m^2。

式（4-62）中 σ、$E_s(0)$、$E(0)$ 在线路参数确定的情况，均为常量，合成电场强度 $E_s(l)$ 是标称电场强度 $E(l)$ 的积分函数。因此，在标称电场强度 $E(l)$ 已经求得的前提下，可通过积分方法获取地面处的合成电场分布情况。获得地面处的合成场强 $E_s(l)$ 及电荷密度 $\rho(l)$ 后，结合式（4-38），可以求得地面处的离子流密度 J。

依据 BPA 方法的求解原理，可得其计算流程如下：

（1）根据皮克公式计算得到导线的起晕电场强度 E_0。

（2）采用逐步镜像法，求解获得导线表面的标称电场强度 $E(0)$。

（3）绘制电力线，形成通量管，要注意尽量采用等位线交割的形式，形成积分微元区域。

（4）采用逐步镜像法，计算电力线上的场强 $E(l)$。

（5）按照式（4-62）计算电力线与地面交点处的合成电场强度 E_s。

（6）按照式（4-63）计算电力线与地面交点处的电荷密度 ρ。

（7）按照式（4-38）计算地面离子流密度 J。

六、算例

已知单回双极直流线路参数如下：额定电压 ±800kV，最高工作电压 ±816kV，导线型式 6×JL/G1A-720/50，导线直径为 36.2mm，分裂间距 500mm，导线极间距为 20m，导线对地高度为 18m，电晕起始场强为 18kV/cm，导线表面电场强度为 23.28kV/cm。计算 ±800kV 单回直流输电线路距离线路中心 10m 处的晴天地面合成电场强度和离子流密度。

解　采用 EPRI 半经验公式法计算地面合成电场强度和离子流密度。

（1）计算地面标称电场强度。

通过子导线中心圆周的直径 D 为：

$$D=2\times\frac{0.5}{2\times\sin\left(\dfrac{180°}{6}\right)}=1\text{m}$$

分裂导线等效直径 d_{eq} 为：

$$d_{eq}=D\sqrt[n]{\frac{nd}{D}}=1\times\sqrt[6]{\frac{6\times0.0362}{1}}=0.7753\text{m}$$

由式（4-43）计算标称电场强度 E：

$$E=\frac{2UH}{\ln\frac{4H}{d_{eq}}-\frac{1}{2}\ln\frac{4H^2+s^2}{s^2}}\left[\frac{1}{H^2+\left(x-\frac{s}{2}\right)^2}-\frac{1}{H^2+\left(x+\frac{s}{2}\right)^2}\right]$$

$$=\frac{2\times816\times18}{\ln\frac{4\times18}{0.7753}-\frac{1}{2}\ln\frac{4\times18^2+20^2}{20^2}}\left[\frac{1}{18^2+\left(10-\frac{20}{2}\right)^2}-\frac{1}{18^2+\left(10+\frac{20}{2}\right)^2}\right]$$

$$=13.152(\text{kV/m})$$

（2）计算导线起始电晕电压。

由式（4-44）计算 U_0：

$$U_0=U\cdot\frac{g_0}{g_{max}}=816\times\frac{18}{23.28}=630.93\ (\text{kV})$$

（3）计算地面合成电场强度。

查图 4-12，s/H=1.11，x/H=0.555，则 $F(x)$=1。

查图 4-14，H/d_{eq}=23.21，U/U_0=1.293，则 K_e=0.814。

由式（4-45）计算地面合成电场强度为：

$$E_s=\frac{U}{H}F(x)\left\{1-\left[K_e\cdot\frac{U_0}{U}\cdot\left(1-\frac{E\cdot H}{U\cdot F(x)}\right)\right]\right\}$$

$$=\frac{816}{18}\times1\times\left\{1-\left[0.814\times\frac{630.93}{816}\times\left(1-\frac{13.152\times18}{816\times1}\right)\right]\right\}$$

$$=25.08(\text{kV/m})$$

（4）计算地面离子流密度。

查图 4-13，s/H=1.11，x/H=0.555，则 C(x)=1.035。

查图 4-15，H/d_{eq}=23.21，U/U_0=1.293，则 K_i=0.734。

由式（4-47）计算离子流密度为：

$$J=\frac{U^2}{H^3}\text{C}(x)\left\{1-K_i\cdot\frac{U_0}{U}\cdot\left[1-\left(1-\frac{U_0}{U}\right)^2\right]\right\}$$

$$=\frac{816^2}{18^3}\times1.035\times\left\{1-0.734\times\frac{630.95}{816}\times\left[1-\left(1-\frac{630.95}{816}\right)^2\right]\right\}$$

$$=54.55(\text{nA/m}^2)$$

七、合成电场与离子流密度的影响因素

合成电场和离子电流密度的大小与导线表面电场强度及起晕电场强度有关，而导线表面电场强度与导线结构，包括极间距、导线高度、子导线分裂间距、导线分裂根数和直径等有关。因此，应选择合适的设计参数，限制导线表面电场强度，使得合成电场强度和离子电流密度满足限值要求。

除上述影响因素，合成电场强度和离子电流密度的大小还与环境气候有关，计算中应考虑空气质量、湿度等因素的影响，相关科研单位正在进行深入研究。我国南、北方空气质量和湿度存在较大差别，目前工程中暂用修正导线对地高度的方法来考虑对直流线路地面合成电场的影响，本节计算中未考虑环境气候对合成电场的影响。

采用 EPRI 半经验公式法，按表 4-12 给出的基本技术参数，计算不同情况下单回双极直流线路的地面最大合成电场强度、地面最大离子流密度如图 4-19～图 4-34，图中符号 d 表示导线直径。

表 4-12　各种电压等级基本技术参数

电压等级	±400kV	±500kV	±660kV	±800kV	±1100kV
导线铝截面（mm²）	300～500	400～900	720～1250	630～1250	800～1250
导线直径（mm）	23.9～30	27.6～40.6	36.2～47.9	33.8～47.9	38.4～47.9
分裂根数	4	4	4	6	8
导线分裂间距（mm）	450	450	500	500	550
极间距（m）	11	13	18	20	26
导线高度（m）	10	12	16	18	26

注　不考虑海拔修正。

（一）不同极间距

图 4-19～图 4-23 给出典型单回双极直流线路在不同极间距时的地面最大合成电场强度与离子流密度。

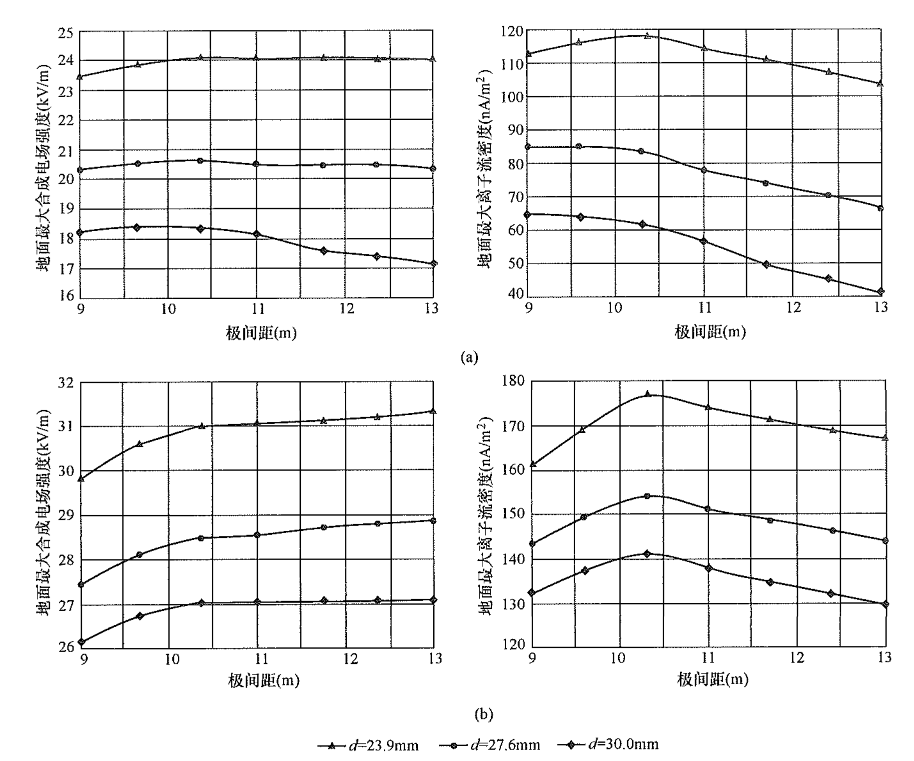


图 4-19 ±400kV 单回双极直流线路不同极间距时地面最大合成场强、最大离子流密度
（a）晴天时；（b）雨天时

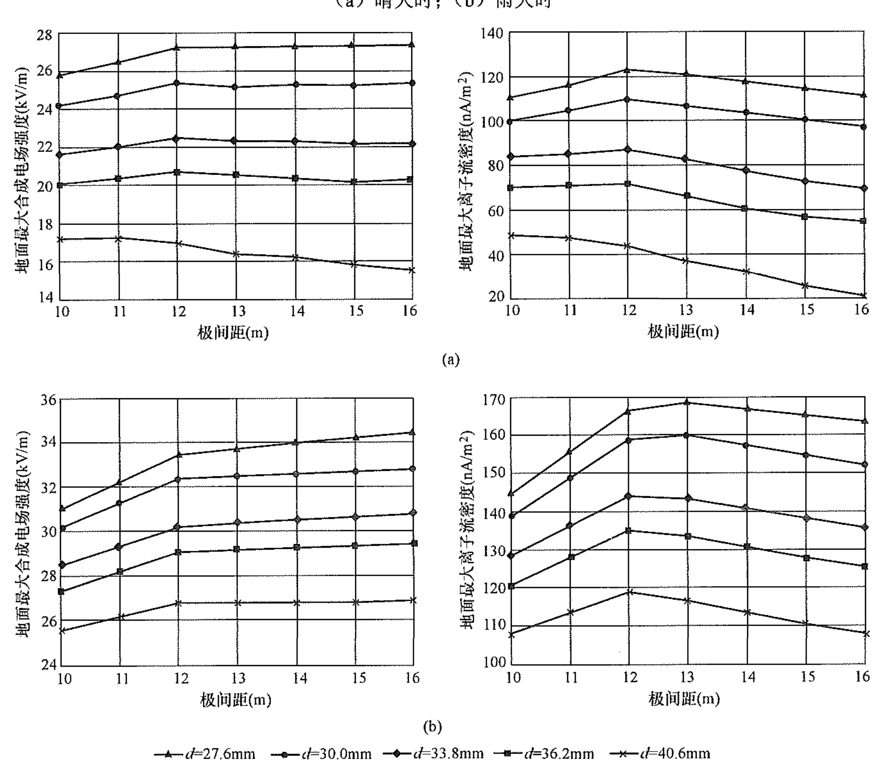


图 4-20 ±500kV 单回双极直流线路不同极间距时地面最大合成场强、最大离子流密度
（a）晴天时；（b）雨天时

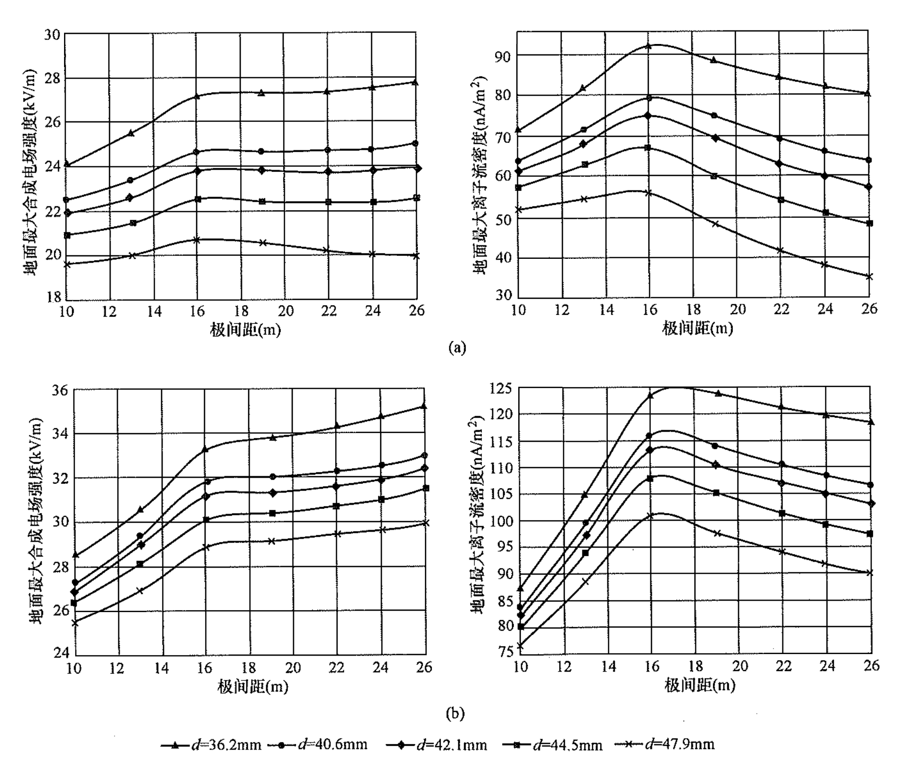


图 4-21 ±660kV 单回双极直流线路不同极间距时地面最大合成场强、最大离子流密度

（a）晴天时；（b）雨天时

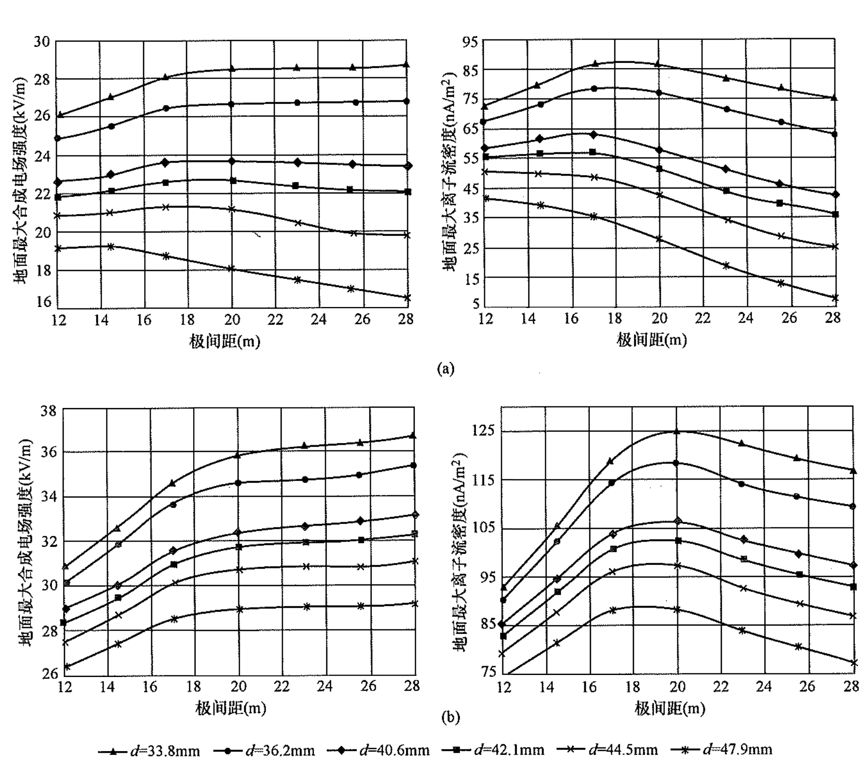


图 4-22 ±800kV 单回双极直流线路不同极间距时地面最大合成场强、最大离子流密度

（a）晴天时；（b）雨天时

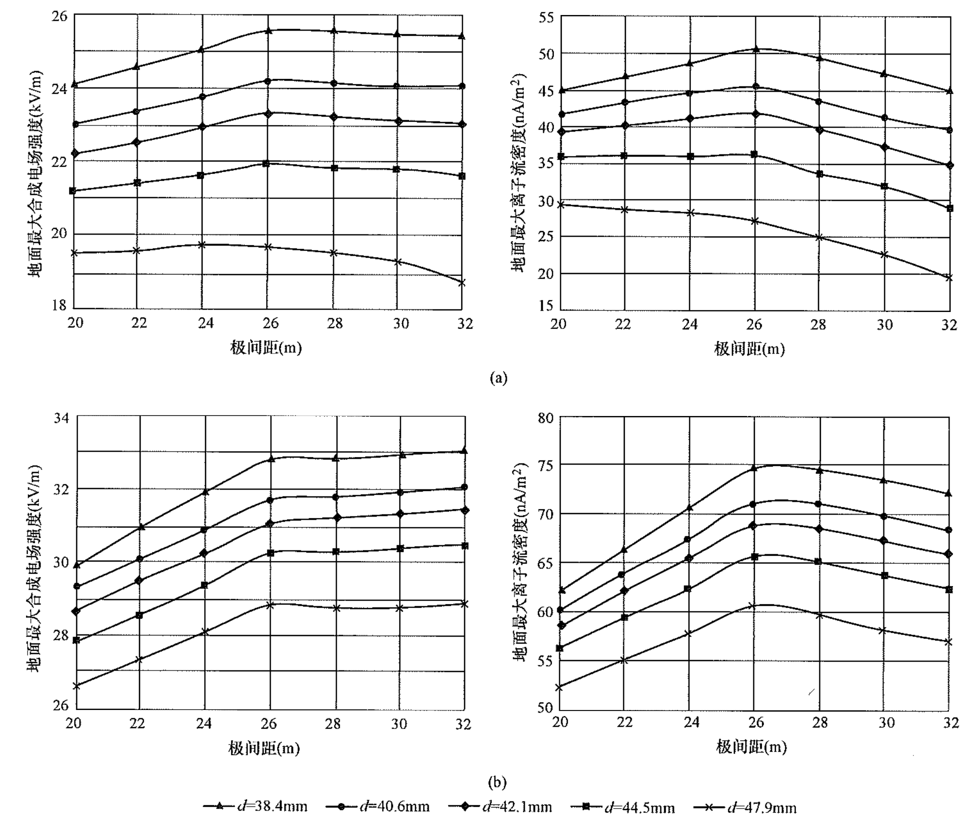


图 4-23 ±1100kV 单回双极直流线路不同极间距时地面最大合成场强、最大离子流密度

（a）晴天时；（b）雨天时

由图 4-19～图 4-23 可知，一般情况下最大离子流密度与极间距的关系曲线中会存在一个拐点，拐点的位置因电压等级和导线截面不同而不同。在这个拐点以前，随着极间距的增加，地面最大合成场强和离子流密度呈增大趋势；经过拐点后，随着极间距的增加，地面最大离子流密度反而减小，而地面最大合成场强基本不变或者缓慢减小，且随着极间距增加，地面合成场强变化趋势与离子流不一致，这是由于虽然离子流密度在减小，但是地面标称电场强度在增加。

（二）不同导线高度

图 4-24～图 4-28 给出典型单回双极直流线路在不同导线高度时的地面最大合成电场强度与离子流密度。

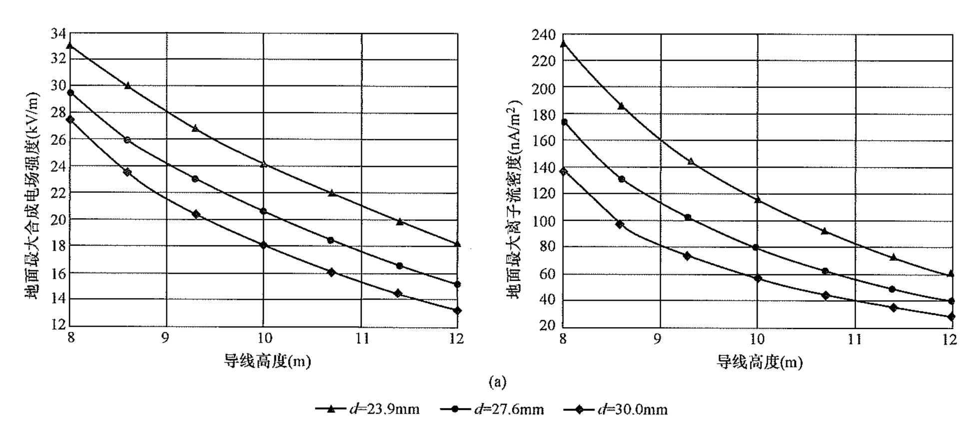


图 4-24 ±400kV 单回双极直流线路不同导线高度时地面最大合成场强、最大离子流密度（一）

（a）晴天时

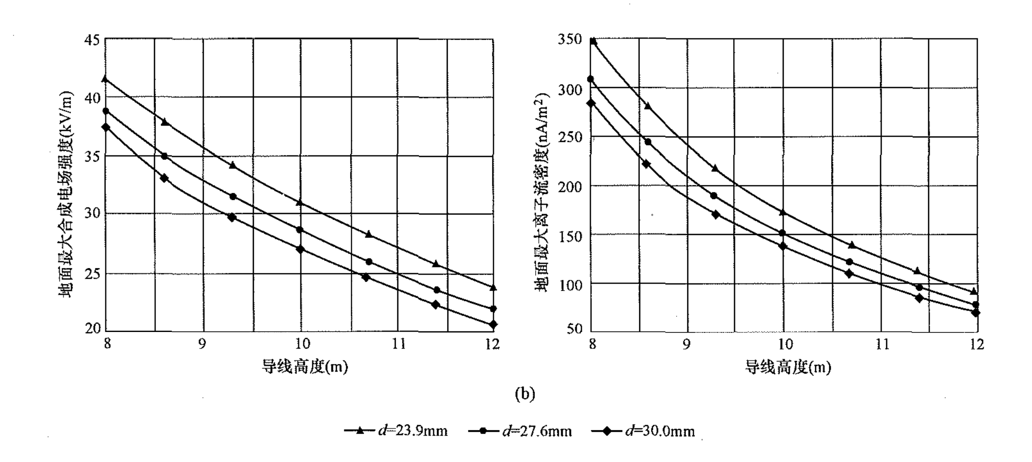


图 4-24 ±400kV 单回双极直流线路不同导线高度时地面最大合成场强、最大离子流密度（二）

（b）雨天时

地面最大合成电场强度(kV/m)

导线高度(m)

地面最大离子流密度(nA/m²)

导线高度(m)

(a)

地面最大合成电场强度(kV/m)

导线高度(m)

地面最大离子流密度(nA/m²)

导线高度(m)

(b)

d=27.6mm　d=30.0mm　d=33.8mm　d=36.2mm　d=40.6mm

图 4-25 ±500kV 单回双极直流线路不同导线高度时地面最大合成场强、最大离子流密度

（a）晴天时；（b）雨天时

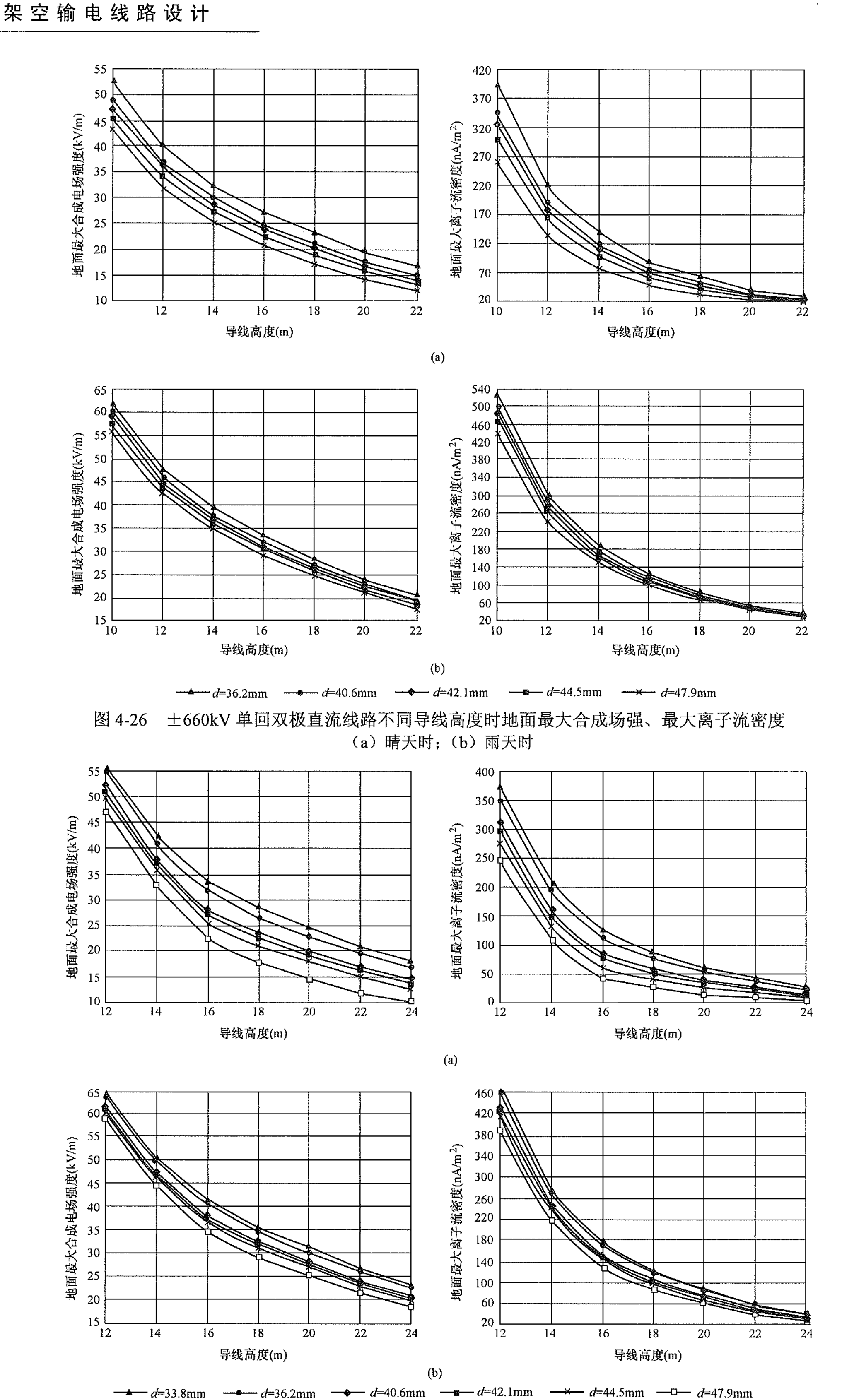


图 4-26 ±660kV 单回双极直流线路不同导线高度时地面最大合成场强、最大离子流密度
(a) 晴天时；(b) 雨天时

图 4-27 ±800kV 单回双极直流线路不同导线高度时地面最大合成场强、最大离子流密度
(a) 晴天时；(b) 雨天时

地面最大合成电场强度(kV/m) 导线高度(m) 地面最大离子流密度(nA/m²) 导线高度(m)

(a)

地面最大合成电场强度(kV/m) 导线高度(m) 地面最大离子流密度(nA/m²) 导线高度(m)

(b)

d=38.4mm d=40.6mm d=42.1mm d=44.5mm d=47.9mm

图 4-28 ±1100kV 单回双极直流线路不同导线高度时地面最大合成场强、最大离子流密度

（a）晴天时；（b）雨天时

由图 4-24～图 4-28 可知，地面最大合成场强和最大离子流密度随着导线高度的增加呈减小趋势；当导线高度增大到一定程度后，减小速度变慢。

（三）不同导线分裂间距

图 4-29～图 4-33 给出典型单回双极直流线路在不同导线分裂间距时的地面最大合成电场强度与离子流密度。

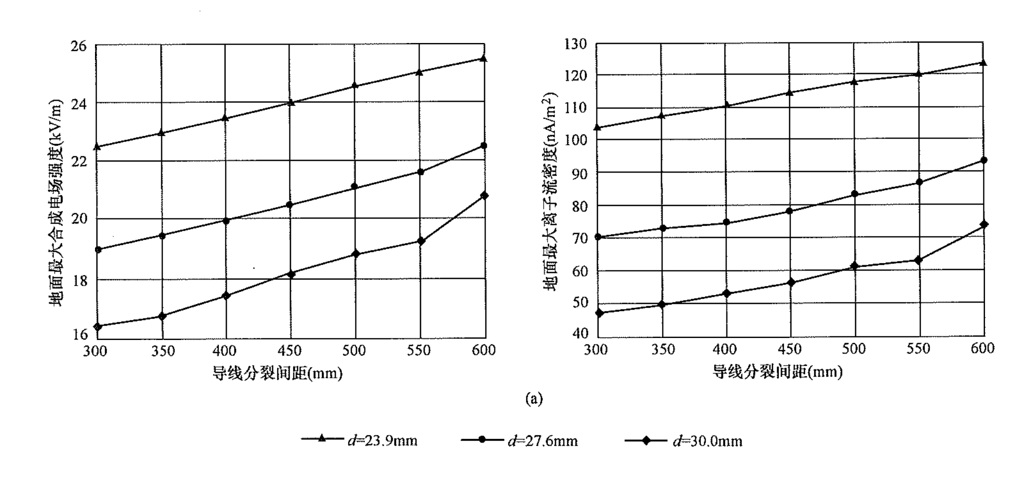


图 4-29 ±400kV 单回双极直流线路地面最大合成场强、最大离子流密度与导线分裂间距关系（一）

（a）晴天时

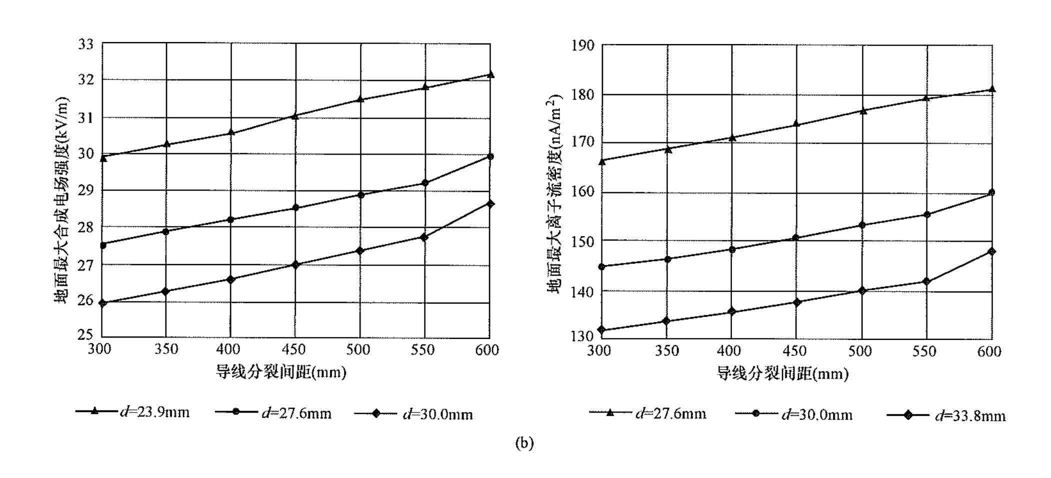


图 4-29　±400kV 单回双极直流线路地面最大合成场强、最大离子流密度与导线分裂间距关系（二）

（b）雨天时

地面最大合成电场强度(kV/m)

导线分裂间距(mm)

地面最大离子流密度(nA/m2)

导线分裂间距(mm)

(a)

地面最大合成电场强度(kV/m)

导线分裂间距(mm)

地面最大离子流密度(nA/m2)

导线分裂间距(mm)

(b)

d=27.6mm　d=30.0mm　d=33.8mm　d=36.2mm　d=40.6mm

图 4-30　±500kV 单回双极直流线路地面最大合成场强、最大离子流密度与导线分裂间距关系

（a）晴天时；（b）雨天时

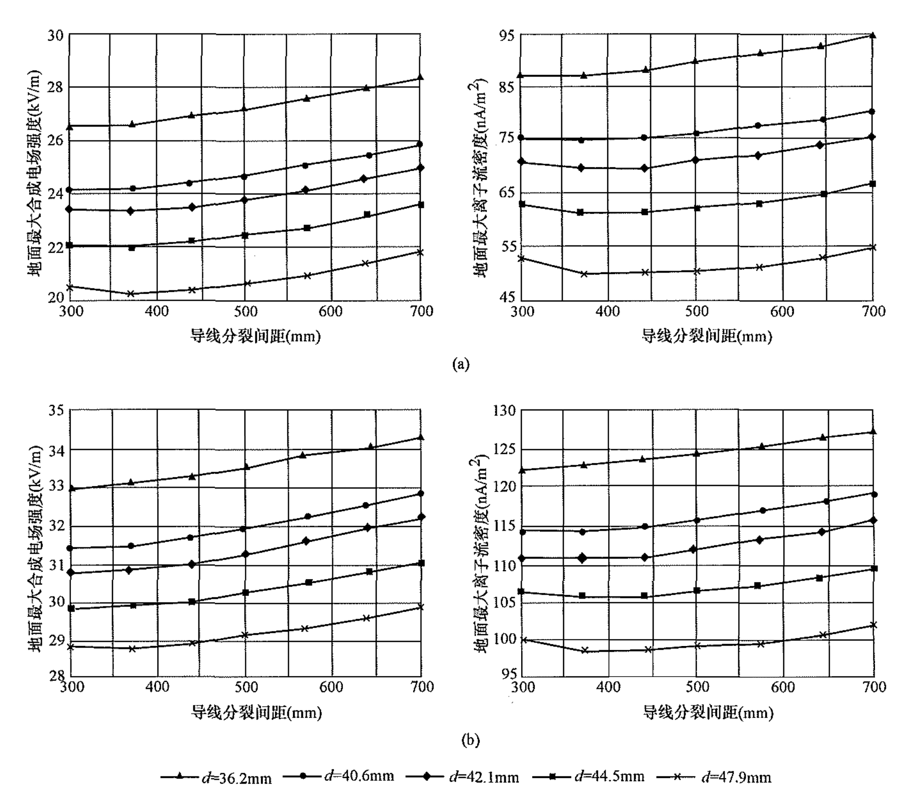


图 4-31 ±660kV 单回双极直流线路地面最大合成场强、最大离子流密度与导线分裂间距关系
（a）晴天时；（b）雨天时

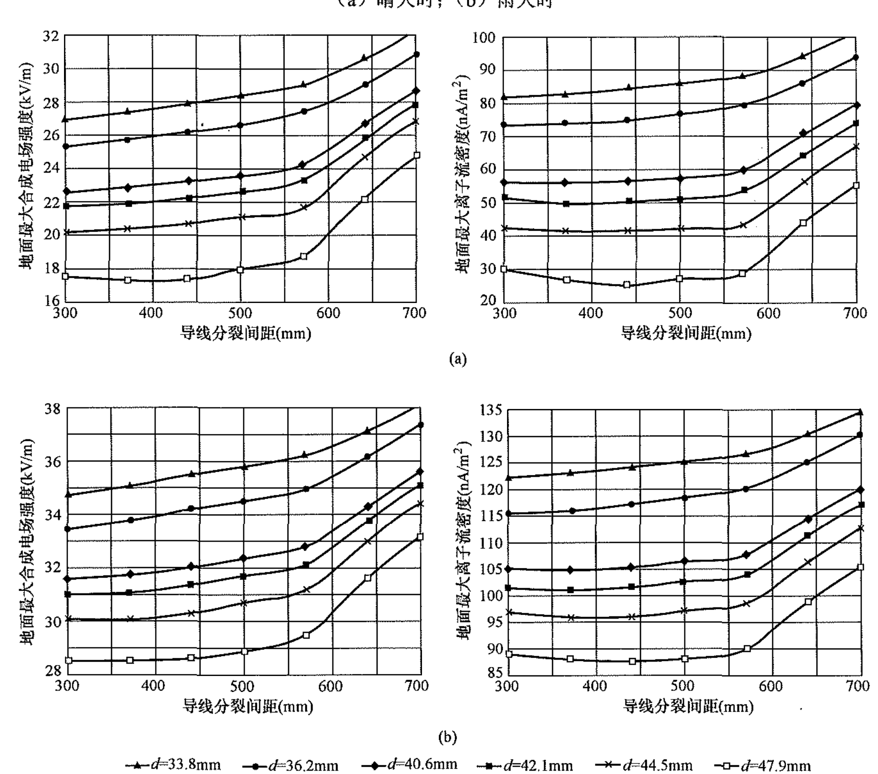


图 4-32 ±800kV 单回双极直流线路地面最大合成场强、最大离子流密度与导线分裂间距关系
（a）晴天时；（b）雨天时

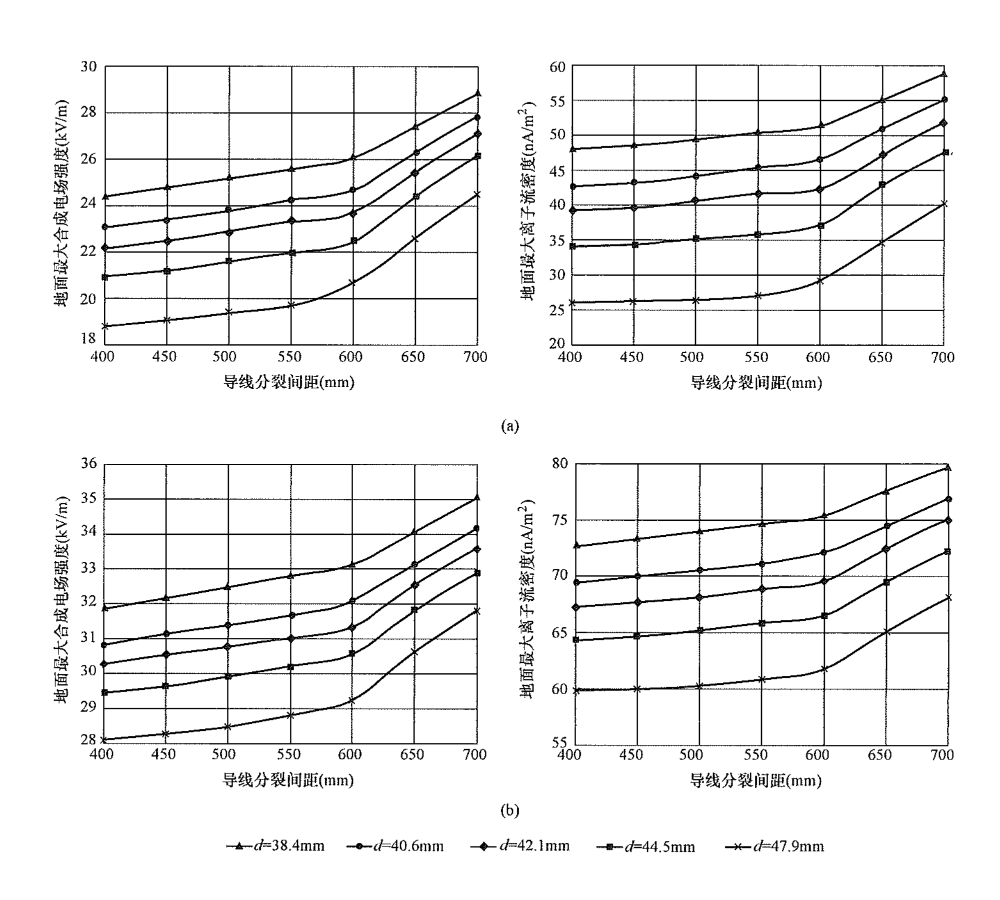


图 4-33　±1100kV 单回双极直流线路地面最大合成场强、最大离子流密度与导线分裂间距关系
（a）晴天时；（b）雨天时

由图 4-29～图 4-33 可知，在分裂间距大于 400mm 时，地面最大合成电场强度和最大离子流密度随分裂间距增大而增大。

（四）不同导线分裂根数和直径

图 4-34 给出典型单回双极直流线路在不同导线分裂根数和直径时的晴天地面最大合成电场强度与离子流密度。

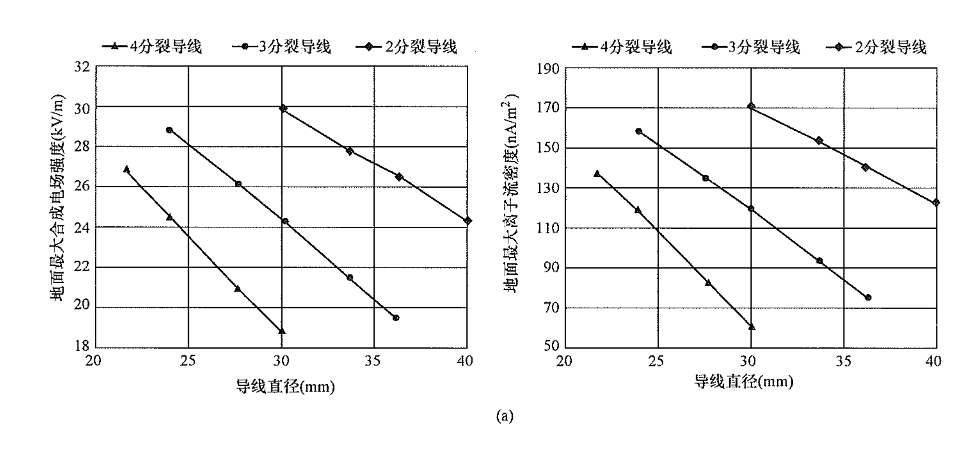


图 4-34　不同电压等级单回双极直流线路地面最大合成场强、最大离子流密度与分裂数和直径的关系（一）
（a）±400kV 直流线路

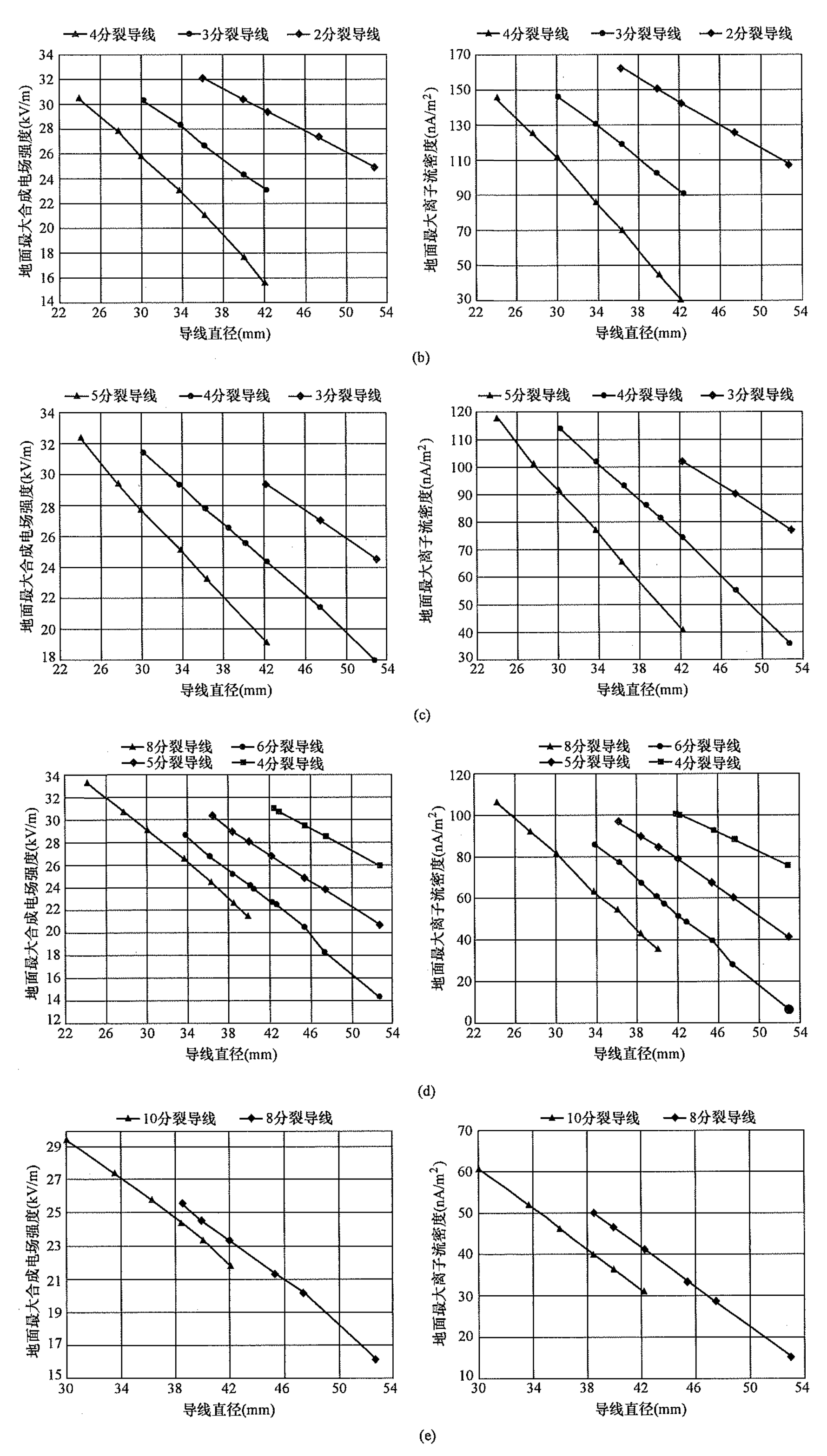


图 4-34 不同电压等级单回双极直流线路地面最大合成场强、最大离子流密度与分裂数和直径的关系（二）
（b）±500kV 直流线路；（c）±660kV 直流线路；（d）±800kV 直流线路；（e）±1100kV 直流线路

由图4-34可知，地面最大合成场强和最大离子流密度随着导线分裂根数和导线直径的增大而减小。

第五节 无线电干扰

一、无线电干扰的形成机理与特性

（一）无线电干扰的形成机理

电晕形成的电流脉冲注入导线，并沿导线向注入点两边流动，从而在导线周围产生电磁场，即无线电干扰场，如图4-35所示。由于高压架空输电线的导线上沿线均匀地出现电晕放电和电流注入点，考虑其合成效应，导线中形成一种脉冲重复率很高的“稳态”电流，所以架空输电线周围就形成了脉冲重复率很高的“稳态”无线电干扰场。如果输电线路无线电干扰频段与临近的无线电工作频段有重合部分，可能对沿线一定范围内的无线电接收设备的工作产生影响。

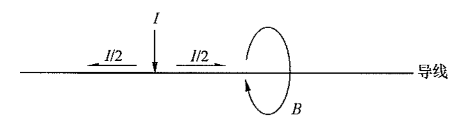


图4-35 电晕产生的无线电干扰示意图

对于正极性导线，电晕放电点在导线表面的分布随机性大，持续的放电点大多出现在导线表面有缺陷处，其放电脉冲幅值大，且很不规则，是无线电干扰的主要来源。对负极性导线，电晕放电点一般均匀分布在整个导线表面，其脉冲幅值小，重复出现的脉冲幅值基本一致，与正极性导线相比，对无线电信号的接收干扰不大。对于双极性直流输电线路，正极性导线产生无线电干扰一般要比负极性大6dB（μV/m）左右。

（二）无线电干扰统计分布特性

大气条件对直流线路无线电干扰的影响较为复杂，根据相关的试验研究结论，直流输电线路无线电干扰随着湿度的增加而减小，随着温度的增加而增加，而气压的改变对无线电干扰没有明显的影响。

1. 下雨对直流输电线路无线电干扰的影响

雨天直流输电线路无线电干扰比晴天有所降低，一般情况下，雨天的无线电干扰水平平均比晴天约低3dB（μV/m）左右。这一情况和交流输电线路明显不同，交流线路雨天无线电干扰水平比晴天高15～28dB（μV/m）。

2. 下雪对直流输电线路无线电干扰的影响

和晴天相比，干雪使直流输电线路无线电干扰增加，湿雪又会使干扰略有减小。

3. 风对直流输电线路无线电干扰的影响

有风时将使直流线路的无线电干扰水平增加，特别是风由负极向正极方向吹时影响最大。根据美国EPRI在试验线段下的试验，当风速大于4m/s，风向由负极导线向正极导线吹时，风速每增加1m/s，无线电干扰增加0.3～0.4dB（μV/m）。当风速小于4m/s时，其他变量的影响掩盖了风的影响。当风由正极导线向负极导线吹时，由于测量数据很少，尚无法给出定量结果。

4. 不同季节对直流输电线路无线电干扰的影响

根据美国EPRI的试验，在晚秋和早冬季节，气温较低，空气湿度较高，直流输电线路的无线电干扰水平较低。夏季是一年中无线电干扰水平最高的季节，此时气温较高，空气湿度较低，导线上又常附着尘埃、昆虫、鸟粪等，加之这一时期风速较大。冬季和早秋季节，无线电干扰水平接近平均值。

基于上述天气、季节对无线电干扰的影响，一般采用具有统计意义的值来表示线路的无线电干扰水平，以下为国际无线电干扰特别委员会（CISPR）提出的几个常用无线电干扰水平值：

（1）95%值，代表大雨条件的平均水平。降雨量超过0.6mm/h时可认为是大雨，大雨时的无线电干扰平均水平是最稳定的。因此，研究人员常选择大雨时平均水平作为计算无线电干扰的基准水平。

（2）好天气的平均值，代表导线干燥时的水平。好天气测量虽然分散性大，但实施测量容易，可获得可靠结果。

（3）（全天候）80%值，介于好天气的平均值和95%之间，与平均值相比，受到不稳定性影响较小，因此被取作“特征电平”。

（三）无线电干扰的横向衰减和频谱特性

1. 无线电干扰横向衰减特性

直流输电线路产生的无线电干扰随着与线路距离的增加而逐渐衰减，图4-36为计算的某直流线路无线电干扰横向衰减曲线。对双极直流线路，由于正极导线是主要无线电干扰源，因此无线电干扰的横向衰减，是以正极性为对称中心，向两侧衰减。

在测量输电线路的无线电干扰时，测量点一般离输电线路比较近，国际上采用比较多的有三种：离边导线对地投影外15m、离边导线对地投影外20m和走廊边沿。我国采用的是离边导线对地投影外20m处。

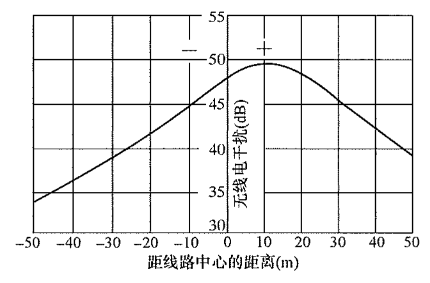


图4-36 无线电干扰的横向衰减曲线

2. 无线电干扰频谱特性

输电线路电晕放电产生的无线电干扰具有白色频谱特性，其频率基本上在30MHz以内。无线电干扰频谱特性用线路附近一定地点的干扰水平随频率变化的函数关系表示，图4-37为典型特高压直流线路的实测频谱特性。从频率特性看出，在低频段，干扰水平较高；随着频率增大，干扰水平减小很快。一般来说，当频率大于10MHz，干扰水平已很小，可忽略不计。国际无线电干扰特别委员会（CISPR）推荐的测量频率为0.5MHz。

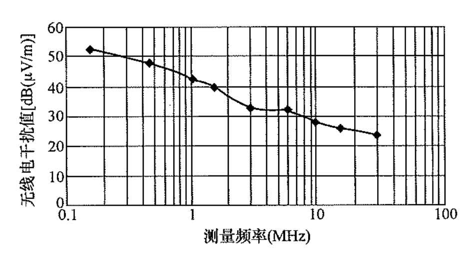


图4-37　无线电干扰的频谱特性

二、无线电干扰的计量和测量

（一）无线电干扰的计量

无线电干扰是一种电磁场辐射干扰，对电磁场的计量主要是对电场强度和磁感应强度的计量。由于电场和磁场分量之间的比值为常数，对电磁场的计量可以归结为电场强度的计量。

通常采用无线电干扰电平衡量输电线路无线电干扰水平，单位为μV/m。用对数来表示电平大小比较方便，一般用dB表示，用dB表示的电平级为：

$$dB = 20\lg\frac{E_1}{E_0} \tag{4-64}$$

式中　E_1——被测电平，μV/m；

E_0——基准电平，1μV/m。

（二）无线电干扰的测量

GB/T 7349—2002《高压架空送电线、变电站无线电干扰测量方法》规定了输电线路无线电的测量仪器和方法。

测量仪器：符合GB/T 6113.1—2008《无线电骚扰和抗扰度测量设备和测量方法规范》，持有效计量检定证书的仪表、准峰值检波器和具有电屏蔽的环状天线或柱状天线。当使用记录器时，应保证不影响测试仪的性能及测量准确度。

测量要求：由于使用柱状天线测量架空输电线路的无线电干扰场的电场分量容易受到其他因素的影响，应优先采用环状天线，环状天线底座高度不超过地面2m，测量时应绕其轴旋转到获得最大读数的位置，并记录方位。在使用柱状测量时，柱状天线应按其使用要求架设，且应避免杆状天线端部的电晕放电影响测量结果。如发生电晕放电，应移动天线位置，在不发生电晕放电的地方测量，或改用环状天线。测量人员和其他设备与天线的相对位置应不影响测量读数，尤其在采用柱状天线时。

测量频率：参考测量频率为0.5（1±10%）MHz，也可用1MHz，为避免在单一频率下测量时，由于线路可能出现驻波而带来的误差影响，应在干扰频带内对各个频率进行测量并画出相应的曲线，测量可在下列频率或其附近频率进行：0.15、0.25、0.50、1.0、1.5，3.0、6.0、10、15、30MHz。

测量位置：测量地点选在地势较平坦，远离建筑物和树木，没有其他电力线和通信、广播线的地方，电磁环境场强至少比来自被测对象的无线电干扰场强低6dB（μV/m）。电磁环境场强的测量，可以在线路停电时进行；或者在距线路400m以外进行。测量点应选在档距中央附近，距线路末端10km以上，若受条件限制应不少于2km，测量点应远离线路交叉及转角点，但在对干扰实例进行调查时，不受此限。测量距离为线路外侧距正极性导线投影20m处，同时为了比较，也可在线路外侧距负极性导线投影20m处测量。

测量数据：在特定的时间、地点和气象条件下，若仪表读数是稳定的，测量读数为稳定时的仪表读数；若仪表读数是波动的，使用记录器记录或每5min读一个数，取其10min的平均值为测量读数。对使用不同天线的测量读数，应分别记录与处理。在给定的气象条件下，每次的测量数据为沿线近似等分布的三个地点的测量读数的平均值。注意，在给定的气象条件下，对某个地点、某个测量频率，一日之内不能获得多于一次的测量数据。测量次数不得少于15次，最好20次以上。在每一种气象条件下，测量次数应与该地区该气象条件出现的频度成正比。

三、无线电干扰的限值

DL 5497—2015《高压直流架空输电线路设计技术规程》和GB 50790—2013《±800kV直流架空输电线路设计规范》中规定：海拔1000m及以下地区，距直流架空输电线路正极性导线对地投影外20m处，80%时间，80%置信度，频率0.5MHz时的无线电干扰限值不应超过58dB（μV/m）。

由于不同天气、季节的线路电晕放电都有明显变化，无线电干扰水平会随天气、季节变化而有很宽范围的变化，因此将无线电干扰限值与统计分布联系起来，即在一年的80%时间中，输电线路产生

的无线电干扰电平不超过某个规定值，并具有 80%的置信度。

在我国第一条±500kV 直流输电线路葛—南直流工程前期设计中，加拿大泰西蒙咨询公司提出距离导线对地投影外 15m、好天气情况下 1MHz 无线电干扰限值可取 58dB（μV/m）甚至更高，而线路实际无线电干扰最大值不到 53dB（μV/m）。鉴于交流电晕产生的无线电干扰与直流电晕产生的无线电干扰具有相似的特性，我国±500kV 直流线路的无线电干扰允许值一直参照 500kV 交流线路的标准执行，即正极性导线对地投影外 20m 处 0.5MHz 无线电干扰 80%时间、80%置信度值不超过 55dB（μV/m）。GB 15707—1995《高压交流架空送电线无线电干扰限值》规定的限值（0.5MHz）见表 4-13，我国交流线路的标准无线电干扰限值是随电压升高而增大的。

表 4-13　我国交流线路无线电干扰限值

电压（kV）	110	220～330	500	750、1000
限值［dB（μV/m）］	46	53	55	58

直流输电线路运行中尚未发生任何投诉，说明取值是可行的。事实上直流线路的无线电干扰的效应要小于交流，因此国外的直流线路允许无线电干扰电平一般较交流线路高 2～3dB（μV/m）。

为确定输电线路无线电干扰限值，CISPR18 提出三个技术要求：①最小被保护的无线电信号水平；②获得满意接收质量的最小信噪比；③保护距离（保护走廊），即边导线到无线电信号能被满意接收地点的最小距离。

对于最小被保护的无线电信号水平，国际电信联盟（ITU）已做出推荐，详见表 4-14。由于城市的电台信号会增强，有些国家允许进入城市的输电线路的无线电干扰限值放宽。

表 4-14　国际电信联盟（ITU）推荐的调幅制声音广播信号的最小服务强度

频率（MHz）	0.5	1.0	1.5
信号强度[dB(μV/m)]	65	60	57

无线电干扰的程度影响由获得满意接收质量的最小信噪比（信号强度和干扰水平值之差）决定，该信噪比取决于噪声源的性质。就电力线路产生的无线电噪声对无线电广播接收的影响而言，不少国家和机构做过主观评价的研究，结论差别不大，详见表 4-15。对于调幅制声音广播，CISPR 所推荐的获得满意接受质量的信噪比平均值为 26dB（μV/m）。

表 4-15　对信噪比的主观评价（信号用平均值检波，干扰用准峰值）

信噪比（dB）	主观评价
40	对古典音乐收听完全满意
32	对一般收听满意
26	不易察觉的背景噪声
20	背景噪声明显
15	背景噪声很明显

由于各国对电力线路的走廊概念和规定各不一样，到目前 CISPR 未能定出适合世界范围的无线电干扰限值，我国直流输电线路保护距离按极导线对地投影外 20m 考虑。

四、无线电干扰的预估

直流输电线路无线电干扰的计算公式主要是根据试验线路和已运行的实际线路大量测量数据总结而得到的，目前主要有美国电力科学研究院（EPRI）、国际无线电干扰特别委员会（CISPR）、Hirsch、Knudsen、BPA 等经验公式，应用较多的是 CISPR 和 EPRI 经验公式。

1. 国际无线电干扰特别委员会（CISPR）经验公式

国际无线电干扰特别委员会（CISPR）推荐的适用于双极直流输电线路无线电干扰计算公式，见 2010 年 CISPR18-1《架空线路和高压设备的无线电干扰特性　第一部分：现象描述》（第 2 版），我国 DL/T 691—1999《高压架空送电线路无线电干扰计算方法》中也推荐采用该公式预估双极性直流线路无线电干扰水平。

$$RI = 38 + 1.6(g_{max} - 24) + 46\lg r + 5\lg n + 33\lg\frac{20}{D_r} + \Delta E_W + \Delta E_f \tag{4-65}$$

$$D_r = \sqrt{H^2 + x^2}$$

$$\Delta E_f = 5[1 - 2(\lg 10f)^2]$$

式中　RI——无线电干扰值，dB（μV/m）；

g_{max}——分裂导线表面最大电场强度，kV/cm；

r——子导线半径，cm；

n——导线分裂根数；

D_r——计算点距正极性导线的距离，m；

H——正极性导线对地距离，m；

x——计算点距正极性导线的水平距离，m；

ΔE_W——气象修正项，每 1000m 增加 3.3dB（μV/m）；

ΔE_f——干扰频率修正项，适用于 0.15～30MHz 频段；

f——所需计算的频率，MHz。

式（4-65）中前 4 项计算得到的干扰值是指在基准频率 0.5MHz 下，距正极性导线 20m 处晴天的干扰值。要得到其他频率、距正极性导线更远处和其他气象条件下的干扰值，应增加后面 3 项计算内容。

式（4-65）计算的是好天气平均值的无线电干扰值，80%时间、80%置信度无线电干扰值应比该值大 3dB（μV/m）。

2. 美国电力科学研究院（EPRI）经验公式

$$RI = 63.0 + 86\lg(g_{max}/25) + 10\lg(n/3) + 40\lg(d/4.57) + 20\lg\left(\frac{1+f_0^2}{1+f^2}\right) + 40\lg\frac{D_0}{D_r} \tag{4-66}$$

式中 RI——无线电干扰值，dB（μV/m）；

d——子导线直径，cm；

f_0——基准频率，1MHz；

H——正极性导线对地距离，m；

x——计算点距正极性导线的水平距离，m；

D_0——距正极性导线的基准距离，一般取 15m；

RI、g_{max}、n、f、D_r——意义与式（4-65）同。

上式计算结果为春秋季节无风时的无线电干扰值，对于夏季和冬季的无线电干扰值，应分别增加和减小 3dB（μV/m）。

3. Hirsch 经验公式

在直流输电线路无线电干扰的试验研究中，Hirsch 等人发现，无线电干扰值与导线表面电位梯度成正比：

$$RI = k(g_{max} - g_0) \tag{4-67}$$

式中 RI、g_{max}——意义与式（4-65）同；

g_0——参考电场强度，kV/cm；

k——试验获得的经验系数，平均值为 2.4。

此外，Hirsch 等人还发现测点与导线之间的距离对无线电干扰的影响。

$$RI = RI_0 - 29.4\lg\frac{D}{D_0} - 20\lg\frac{1+f^2}{1+f_0^2} \tag{4-68}$$

式中 RI——无线电干扰值，dB（μV/m）；

D——测点与导线之间的距离，m；

f——测量频率，MHz；

RI_0、D_0、f_0——相应的参考值。

4. Knudsen 经验公式

瑞典的 Knudsen 等人根据试验线段的测量结果拟合了直流输电线路无线电干扰的经验公式：

$$RI = 25 + 10\lg n + 20\lg r + 1.5(g_{max} - g_0) - 40\lg\frac{D}{D_0} \tag{4-69}$$

式中 RI——无线电干扰值，dB(μV/m)；

n——导线分裂数；

r——子导线半径，cm；

g_{max}——分裂导线表面最大电场强度，kV/cm；

D——测点与正极性导线之间的距离，m；

g_0、D_0——参考值，$g_0 = 22\delta$ kV/cm、$D_0 = 30$m；

δ——大气校正系数，$\delta = 289\times10^{-5}p/(273+t)$；

p——大气压强，Pa；

t——温度，℃。

5. BPA 经验公式

美国BPA利用在达拉斯直流试验场测量得到的数据，拟合了双极直流输电线路的无线电干扰经验公式：

$$RI = 51.7 + 86\lg\frac{g_{max}}{g_0} + 40\lg\frac{d}{d_0} \tag{4-70}$$

式中 RI——无线电干扰值，dB（μV/m）；

g_{max}——分裂导线表面最大电场强度，kV/cm；

d——子导线直径，cm；

g_0、d_0——参考值，$g_0 = 25.6$kV/cm、$d_0 = 4.62$cm。

6. 海拔修正方法

在海拔对直流输电线路的无线电干扰水平的影响方面，国外研究的较少，国内研究单位正在进行深入研究，目前一般采用美国 EPRI 推荐的交流线路无线电干扰海拔修正方法，即海拔每增加 300m，无线电干扰增加 1dB（μV/m）。

五、无线电干扰的影响因素

极间距、导线高度、子导线分裂间距、导线分裂根数直径等因素对导线的无线电干扰有一定影响。采用 CISPR 经验公式，按表 4-16 给出的基本技术参数，计算不同情况下单回双极直流线路正极导线投影外 20m 处 80%时间、80%置信度、0.5MHz 频率时的无线电干扰值，见图 4-38～图 4-41，图中符号 d 表示导线直径。

表 4-16 各种电压等级基本技术参数

电压等级	±400kV	±500kV	±660kV	±800kV	±1100kV
导线铝截面（mm²）	300～500	400～900	720～1250	630～1250	800～1250
导线直径（mm）	23.9～30	27.6～40.6	36.2～47.9	33.8～47.9	38.4～47.9
分裂根数	4	4	4	6	8
导线分裂间距（mm）	450	450	500	500	550
极间距（m）	11	13	18	20	26
导线高度（m）	15	17	21	23	31

注 不考虑海拔修正。

（一）不同极间距

图 4-38 给出典型单回双极直流线路在不同极间距时的无线电干扰。

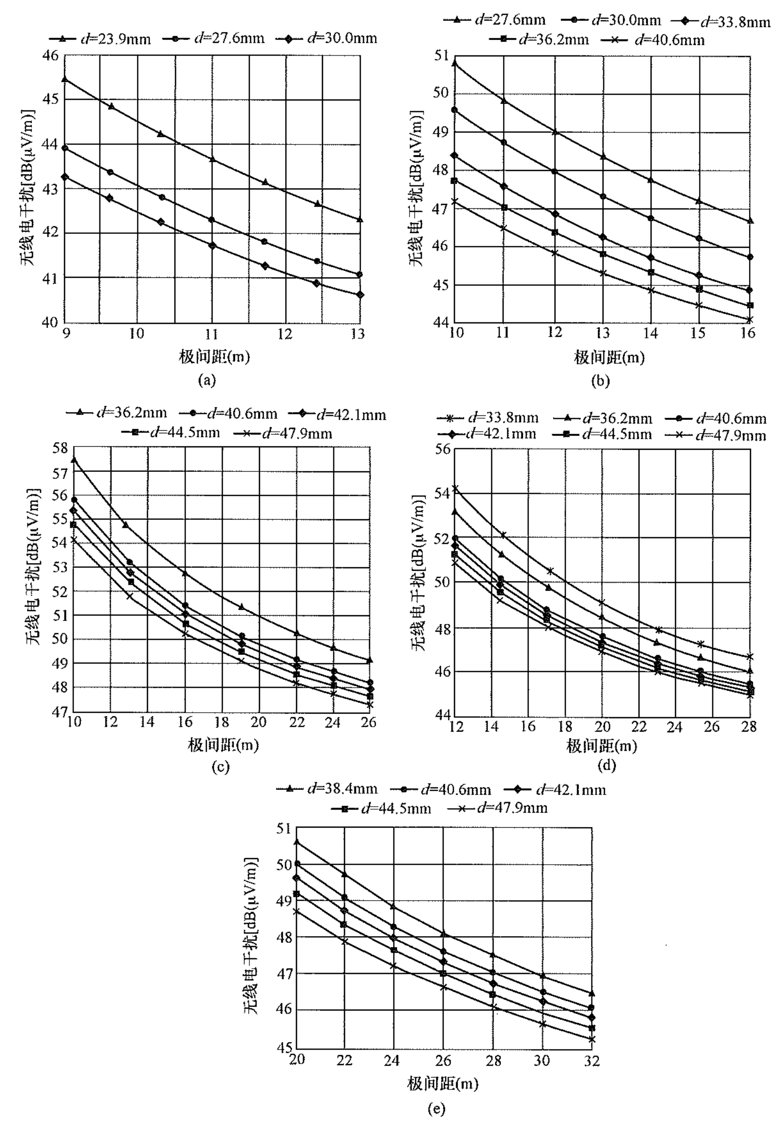


图 4-38 典型双极直流线路不同极间距时无线电干扰

（a）±400kV 直流线路；（b）±500kV 直流线路；（c）±660kV 直流线路；（d）±800kV 直流线路；（e）±1100kV 直流线路

由图 4-38 可知，无线电干扰随着极间距增加而减小；极间距越大，减小速度越慢；随着电压等级的提升，减小速度逐渐减慢，表 4-17 给出无线电干扰随极间距的变化规律。

表 4-17 无线电干扰随极间距的变化规律

电压等级	随极间距增大而减小的无线电干扰值 [dB（μV/m）]
±400kV	0.46～1
±500kV	0.37～0.94
±660kV	0.2～0.93
±800kV	0.19～0.84
±1100kV	0.2～0.47

（二）不同导线高度

图 4-39 给出典型单回双极直流线路在不同导线高度时的无线电干扰。

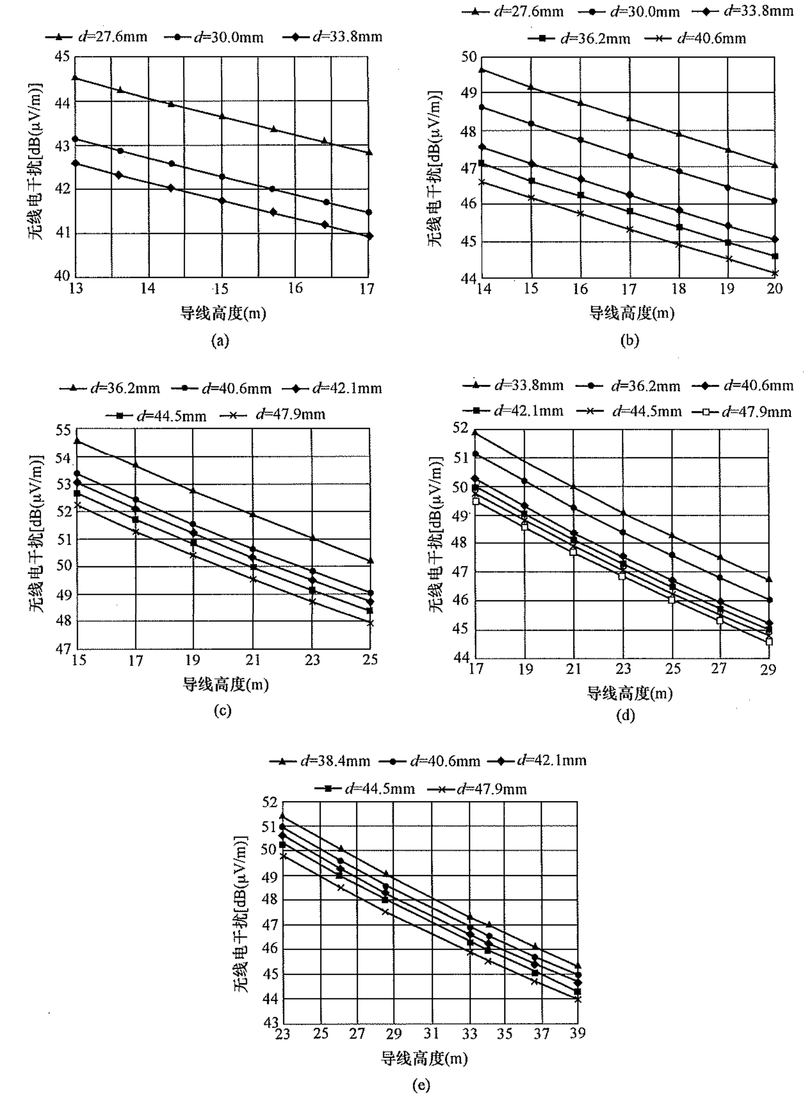


图 4-39 典型双极直流线路不同导线高度时无线电干扰

（a）±400kV 直流线路；（b）±500kV 直流线路；（c）±660kV 直流线路；（d）±800kV 直流线路；（e）±1100kV 直流线路

由图 4-39 可知，无线电干扰随着导线高度增加而减小；减小速度对电压等级不敏感，表 4-18 给出无线电干扰随导线高度的变化规律。

表 4-18 无线电干扰随导线高度的变化规律

电压等级	随导线高度增大而减小的无线电干扰值［dB（μV/m）］
±400kV、±500kV	0.4～0.46
±660kV、±800kV	0.37～0.49
±1100kV	0.32～0.44

（三）不同导线分裂间距

图4-40给出典型单回双极直流线路在不同导线分裂间距时的无线电干扰。

由图 4-40 可知，随着导线分裂间距的增加，无线电干扰一般呈现先减小后增大的趋势，无线电干扰随导线分裂间距的变化曲线存在一个拐点，拐点与电压等级和导线直径有关。

（四）导线分裂根数和直径

图4-41给出典型单回双极直流线路在不同导线分裂根数、直径时的无线电干扰。

由图 4-41 可知，无线电干扰随着导线分裂根数的增加而减小，随导线直径的增大而减小。

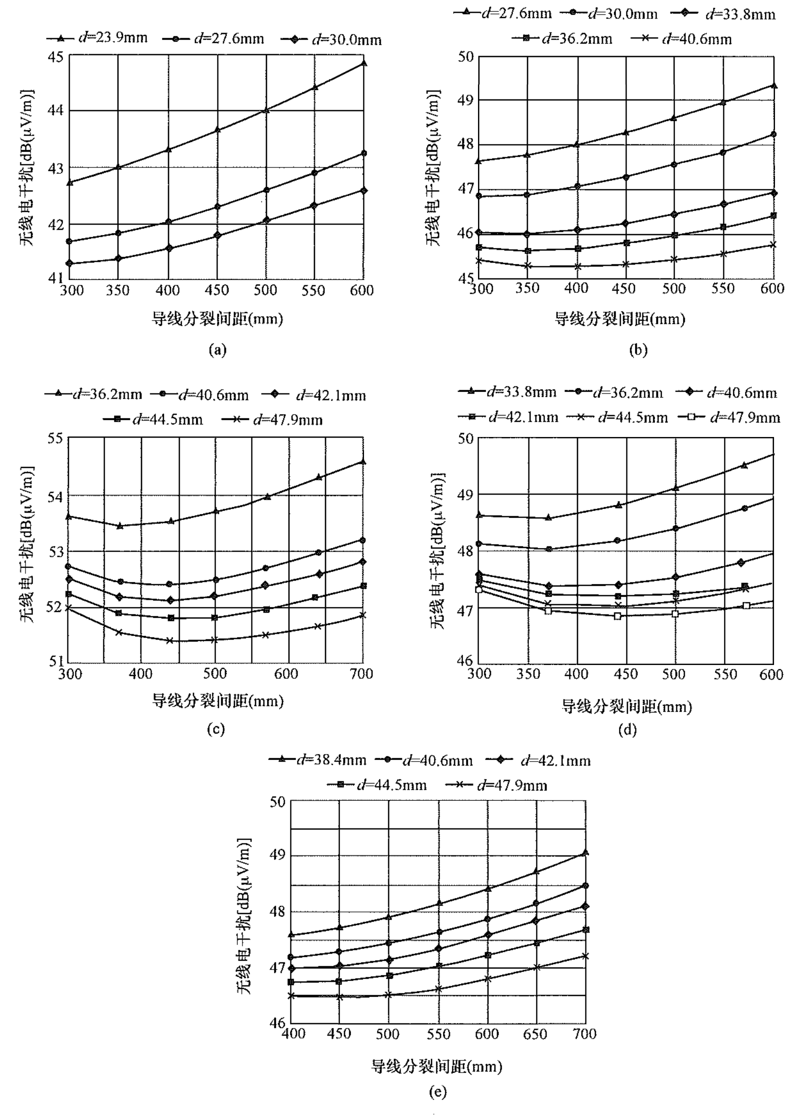


图 4-40　典型双极直流线路不同导线分裂间距时无线电干扰

（a）±400kV 直流线路；（b）±500kV 直流线路；（c）±660kV 直流线路；（d）±800kV 直流线路；（e）±1100kV 直流线路

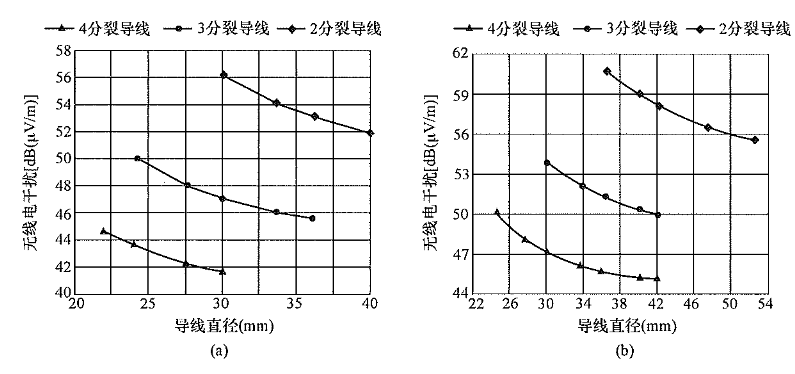


图 4-41　典型双极直流线路不同导线分裂根数和直径时无线电干扰（一）

（a）±400kV 直流线路；（b）±500kV 直流线路

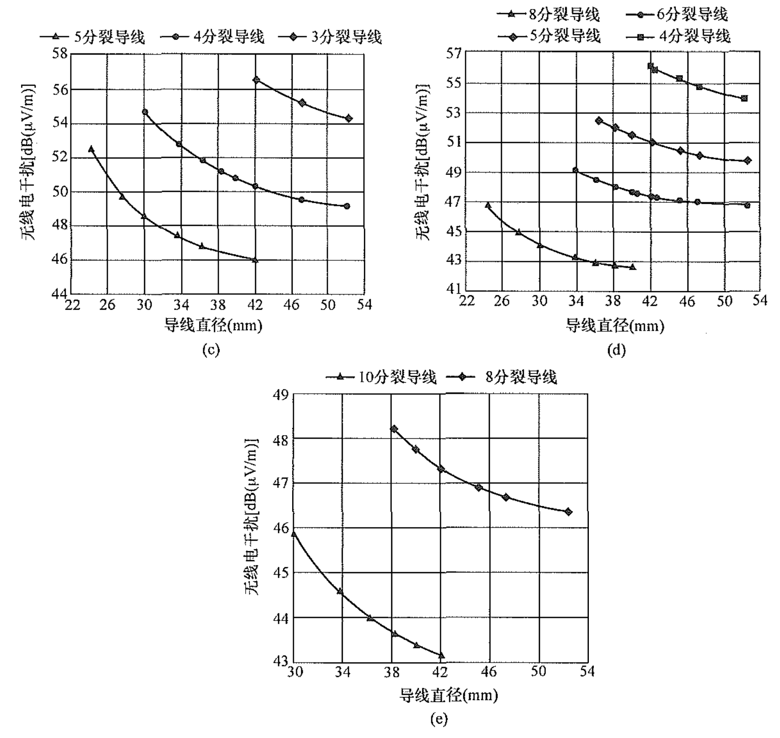


图 4-41 典型双极直流线路不同导线分裂根数和直径时无线电干扰（二）

（c）±660kV 直流线路；（d）±800kV 直流线路；（e）±1100kV 直流线路

六、算例

已知线路参数如下：额定电压±800kV，导线型式为 6×JL/G1A-720/50，单根导线直径为 36.2mm，分裂间距 450mm，导线极间距为 20m，导线平均高度为 23m，导线表面最大场强为 22.54kV/cm。计算±800kV 单回直流输电线路距正极性导线对地投影外 20m 处无线电干扰值。

解 1. CISPR 经验公式法

（1）计算正极性导线到计算点之间的距离：

$$D_r=\sqrt{20^2+23^2}=30.48\text{m}$$

（2）计算干扰频率修正值：

$$\Delta E_f=5\left[1-2\left(\lg(10\times0.5)\right)^2\right]=0.114$$

（3）预估 80%时间、80%置信度、0.5MHz 频率时无线电干扰值。

根据式（4-65）得到好天气的无线电干扰平均值为：

$$\begin{aligned}RI&=38+1.6(g_{\max}-24)+46\lg r+5\lg n+\\&\quad\Delta E_f+33\lg\frac{20}{D_r}+\Delta E_W\\&=38+1.6\times(22.54-24)+46\lg1.81+5\lg6+\\&\quad0.114+33\lg\frac{20}{30.48}\\&=45.48\text{dB}(\mu\text{V/m})\end{aligned}$$

80%时间、80%置信度、0.5MHz 频率时，无线电干扰值即为 48.48dB(μV/m)。

2. EPRI 经验公式法

（1）计算正极性导线到计算点之间的距离：

$$D_r=\sqrt{20^2+23^2}=30.48\text{m}$$

（2）预估春秋季节无风时的无线电干扰。

根据式（4-66）得到春秋季节无风时的无线电干扰值为：

$$\begin{aligned}RI&=63.0+86\log(g_{\max}/25)+10\lg(n/3)+\\&\quad40\lg(d/4.57)+20\lg\left(\frac{1+f_0^2}{1+f^2}\right)+40\lg\frac{D_0}{D_r}\\&=63.0+86\lg(22.54/25)+10\lg(6/3)+\\&\quad40\lg(3.62/4.57)+20\lg\frac{1+1^2}{1+0.5^2}+40\lg\frac{15}{30.48}\\&=49.85\text{dB}(\mu\text{V/m})\end{aligned}$$

第六节 可 听 噪 声

一、可听噪声产生机理与特性

（一）可听噪声产生机理

当导线表面电场强度大于起晕电场强度时，会引起导线周围的空气电离放电。在放电过程中，带电粒

子在电场力的作用下加速后，具有较高能量的带电粒子与中性分子发生弹性碰撞，将能量和动能传递给中性分子；由于电晕放电具有一定的脉冲特性，能量和动能的传播速度随时间和空间的变化而发生变化，引起声波的产生和传播，其中处在声能频谱中为人耳所能感受到的部分，称为“可听噪声”。

输电线路因电晕放电产生可听噪声，严重时会给线路附近居民带来烦躁和不安，因此设计和建设直流线路时，应将可听噪声限制在合理范围内。

（二）可听噪声统计分布特性

通过大量试验研究证明，直流线路电晕放电产生的可听噪声主要来源于正极性流注放电，因此通常用正极线路产生的可听噪声来衡量整体线路可听噪声水平。

对于交流输电线路，晴天时的可听噪声很小，一般是在小雨、雾和下雪时，导线表面受潮，表面附着水滴，此时可听噪声较大，因此交流输电线路重点考虑雨天的情况。而对于直流输电线路，雨天时导线的起晕电场强度比晴天低，导线周围的离子比晴天多；下雨初期，导线表面离子浓度不大，电晕放电比晴天稍强；下雨延续一段时间后，导线表面离子增加，使得导线不规则的部位都被较浓的电荷包围，减小电晕放电强度，使得可听噪声反而有所减小。

空中飘落物附在导线上也会使局部表面场强增大，可听噪声增加，这些飘落物会随季节变化，夏季较多。因此，在确定直流输电线路可听噪声的限值时，应重点考虑夏季晴天的情况。相比夏季晴天情况，春秋季节可听噪声减小 2dB（A），冬季减小 4dB（A）；相比晴天情况，雨天的可听噪声减小 6dB（A）。

（三）可听噪声的频谱特性和横向衰减特性

1. 频谱特性

在人耳能听到的声音频率内（20Hz～20kHz），直流输电线路电晕产生的可听噪声频谱曲线比较平坦。图 4-42 给出±750kV 输电线路（导线为 4×40.64mm）的实测结果，从图中可以看出，环境噪声在 100Hz 后明显衰减，而直流输电线路的可听噪声在频率很高时才开始衰减，在环境噪声较低的场合，电晕产生的噪声很容易分辨。

2. 横向衰减特性

由于直流线路电晕放电产生的可听噪声主要来源于正极性流注放电，直流线路可听噪声向两侧横向衰减，对称轴是正极性导线。随着距离的增加，可听噪声的衰减要比无线电干扰的衰减慢得多，距离增加一倍可听噪声衰减约 2.6dB（A）。图 4-43 是美国 EPRI 在±600kV 试验线路下晴天时先后 5 次测得的可听噪声横向分布，图中曲线是 5 次的平均值。

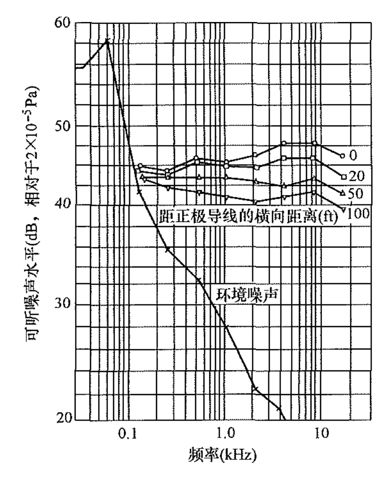


图 4-42　直流输电线路可听噪声频谱特性与环境噪声的比较

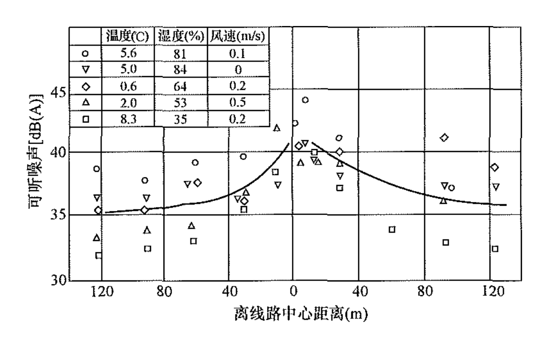


图 4-43　±660kV 试验线路下晴天可听噪声横向分布

二、可听噪声的计量和测量

（一）可听噪声的计量

输电线路可听噪声的计量方式可分为两类，一类是描述声波客观特性的物理量度，常用声压表示，单位为μPa；另一类是考虑噪声对人听觉刺激的主观量度，由于人能听到的声压级范围很大，用对数来表示声压大小比较方便，常用声压级表示，单位为 dB。

可听噪声用声压级来计量时，由于 20μPa 是正常人在 1000Hz 时能听到的最低声压，通常是以 20μPa 为基准声压，用分贝表示声压级：

$$dB = 20\lg\frac{P}{P_0} \tag{4-71}$$

式中　P——被测声压，μPa；

P_0——基准声压，20μPa。

噪声可看成不同频率分量的合成，不同频率的声音，即使声压相同，人耳感觉的响亮程度也不同，人耳对 1000～5000Hz 的声音最敏感。为使声音的客观量度和人耳听觉的主观感受近似一致，通常在测量声

音的声级计中，安装一个滤波网络。当含有各种频率的噪声通过滤波网络时，滤波网络对不同频率成分的衰减是不一样的。声级计的滤波网络一般有 A、B、C 和 D 频率计权网络，A、B、C 计权网络的主要差别在于对低频成分衰减程度，A 衰减最多，B 其次，C 最少，D 计权专用于飞机噪声的测量。图 4-44 中给出 A、B、C 和 D 计权的特征，因 A 频率计权网络是模拟人耳对纯音的平均响应，其应用最广泛，直流输电线路的可听噪声即采用 A 计权声级，用该网络计权后所测声压用 dB（A）表示。

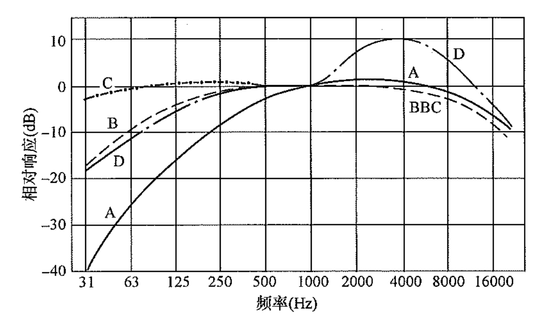


图 4-44 声级计的计权特征

对于一个非稳态噪声，用计权声级只能测出某一时刻的噪声值，即瞬时值。用一个在相同时间内声能与之相等的连续稳定 A 声级表示该时段内不稳定噪声的声级，即为等效连续 A 声级，用 L_{Aeq} 表示，单位为 dB（A），它反映在噪声起伏变化的情况下，噪声受者实际接收噪声能量的大小，可表示为：

$$L_{Aeq}=10\lg\frac{1}{T}\int_{o}^{T}10^{\frac{L_{Ai}}{10}}\mathrm{d}t \qquad (4\text{-}72)$$

式中 L_{Ai}——某一时刻 t 的噪声级；

T——测量的总时间。

对于非稳态噪声，也可采用统计方法，以声级出现的概率或累计概率来表征对噪声能量进行平均后的起伏变化情况，即统计声级。在规定测量时间 T 内，有 N%时间的声级超过某一 L_{PA} 值，该 L_{PA} 值叫做统计声级或累计百分声级，用 L_N 表示，单位为 dB（A）。例如，L_{10}=50dB（A），表示在整个测量时段内，声级高于 50dB（A）的时间占 10%。

我国环境噪声标准中的限值采用的是等效 A 频率计权网络 L_{Aeq}，而电力行业给出的可听噪声限值是 50%值 L_{50}。对于直流输电线路可听噪声，EPRI 认为 L_{Aeq} 和 L_{50} 之间的关系为：

$$L_{Aeq}=L_{50}+0.115S^2 \qquad (4\text{-}73)$$

式中 S——标准差。

$$L_5-L_{50}=1.64S \qquad (4\text{-}74)$$

EPRI 指出，对输电线路晴天 24h 测量的数据标准，L_5 与 L_{50} 的差值为 3～5dB（A），由式（4-74）可得 S=1.83～3.05dB（A）。再由式（4-73）可得：

$$L_{Aeq}-L_{50}=0.38\sim1\text{dB（A）} \qquad (4\text{-}75)$$

对于直流输电线路，晴天时的噪声比雨天时的大，在线路发生电晕噪声期间，噪声稳定，噪声的标准偏差比 24h 内的小，因此

$$L_{Aeq}-L_{50}\approx0.38\text{dB（A）} \qquad (4\text{-}76)$$

$$L_{Aeq}\approx L_{50} \qquad (4\text{-}77)$$

由此可认为，按输电线路发生电晕噪声期间的 L_{50} 值与 L_{Aeq} 限值是基本一致的。

（二）可听噪声的测量

DL 501—1992《架空送电线路可听噪声测量方法》为输电线路可听噪声的测量规定了仪器和方法。

测量位置应在两侧塔高基本相同的档距中央，与线路外侧导线垂直对地投影处的距离可按实际需求选取。

测量时，噪声计距地面高度为 1.5m，传声器对准噪声源方向以测得最大值为原则。为了保证传声器位置距地面高度不变，宜将仪器安装在专用支架上。

如果不用支架，测量人员手持仪器必须将手臂伸直，传声器对准噪声源方向，使仪表读数为最大，不能将仪器靠近身体，影响测量的准确度。

室外测量时传声器应加防风罩，雨雪天气或风速超过 6m/s 时应停止测量。

测量地点应选择地势比较平坦、周围无障碍物、背景噪声较低的地区。

三、可听噪声限值

GB 50790—2013《±800kV 直流架空输电线路设计规范》和 DL 5497—2015《高压直流架空输电线路设计技术规程》对可听噪声限值规定如下：海拔 1000m 及以下地区，距直流架空输电线路正极性导线对地投影外 20m 处，晴天时由电晕产生的可听噪声 50%值（L_{50}）不得超过 45dB（A）；海拔高度大于 1000m 且线路经过人烟稀少地区时，控制在 50dB（A）以下。

我国与环境噪声有关的标准有 GB 3096—2008《声环境质量标准》、GB 12348—1990《工业企业厂界噪声标准》、GB 12523—1990《建筑施工场界噪声限值》等，其中前两个标准对不同的区域划分相应的噪声标准，见表 4-19。

表 4-19 中国的环境噪声标准 dB（A）

类别	昼间	夜间
0	50	40
1	55	45

续表

类别	昼间	夜间
2	60	50
3	65	55
4	70	55

注 1. 0类标准适用于疗养区、高级别墅区、高级宾馆区等特别需要安静的区域（工业企业厂界噪声无此类标准）。
2. 1类标准适用于以居住、文教机关为主的区域。乡村居住环境可参照执行该类标准。
3. 2类标准适用于居住、商业、工业混杂区。
4. 3类标准适用于工业区。
5. 4类标准适用于城市中的道路交通干线道路两侧区域，穿越城区的内河航道两侧区域。

对于直流输电线路，海拔 1000m 及以下地区满足 1 类地区的夜间噪声限值，海拔高度大于1000m且线路经过人烟稀少地区满足2类地区的夜间噪声限值。

我国交流输电线路的可听噪声限值规定为：在海拔不超过1000m时，边相导线投影外20m处湿导线条件下可听噪声限值为 55dB（A）。湿导线条件下可听噪声值是指年出现概率值为5%的可听噪声值，换算到晴天50%概率的可听噪声值要减去7～10dB(A)。直流线路可听噪声晴天比雨天大，因此直流线路可听噪声限值（晴天50%概率的可听噪声值）参照交流线路可听噪声限值选取，一般乡村居住环境区可听噪声限值取 45dB（A），人烟稀少地区可听噪声限值取 50dB（A）。

四、可听噪声的预估方法

直流噪声主要由正极性线路产生，因此对于单回双极直流线路，只需计算正极性导线产生的噪声。直流线路的可听噪声可以利用经验公式估算，这些公式一般是根据试验线路和已运行实际线路大量的测量数据经归纳而得到的。美国、加拿大、德国、日本等国家均有各自的计算公式，美国 EPRI 和 BPA 总结出的公式应用较多。

1. 美国电力科学研究院（EPRI）经验公式

美国 EPRI 总结出预估直流输电线路电晕产生的可听噪声计算公式为

$$AN = 56.9 + 124\lg\left(\frac{g_{max}}{25}\right) + 25\lg\left(\frac{d}{4.45}\right) + 18\lg\left(\frac{n}{2}\right) - 10\lg D_r - 0.02D_r + k_n \tag{4-78}$$

式中 AN——可听噪声值，dB（A）；
g_{max}——导线表面最大电场强度，kV/cm；
d——导线直径，cm；
n——导线分裂数；
D_r——正极性导线到计算点之间的距离，m；
k_n——修正项。当 $n \geqslant 3$ 时，$k_n = 0$ dB（A）；当 $n = 2$ 时，$k_n = 2.6$ dB(A)；当 $n = 1$ 时，$k_n = 7.5$ dB（A）。

采用该式计算得到的是夏季晴天可听噪声的50%值（L_{50}）。

2. 美国邦纳维尔电力局（BPA）经验公式

美国BPA总结出预估直流输电线路电晕产生的可听噪声的公式见式（4-79），该式计算得到的是春秋季节好天气时可听噪声的50%值。

$$AN = -133.4 + 86\lg g_{max} + 40\lg d_{eq} - 11.4\lg D_r \tag{4-79}$$

其中

$$d_{eq} = 0.66n^{0.64}d \quad (n>2) \tag{4-80}$$

$$d_{eq} = d \quad (n=1, 2) \tag{4-81}$$

式中 AN、g_{max}、d、n、D_r——意义与式（4-78）同。

3. 德国 FGH 公司经验公式

德国 FGH 公司总结出预估直流输电线路电晕产生的可听噪声的公式见式（4-82），该式计算得到的是晴天最大值，适用范围：$2 \leqslant n \leqslant 5$，$1 \leqslant r \leqslant 2$。

$$AN = 1.4g_{max} + 10\lg n + 40\lg 2r - 10\lg D_r - 1 \tag{4-82}$$

式中 r——导线半径，cm；
AN、g_{max}、n、D_r——意义与式（4-78）同。

4. 魁北克水电局（IREQ）经验公式

魁北克水电局（IREQ）总结出的预估直流输电线路电晕产生的可听噪声的公式为：

$$AN = k(g_{max} - 25) + 10\lg n + 40\lg 2r - 11.4\lg D_r + AN_0 \tag{4-83}$$

式中 r——导线半径，cm；
AN、g_{max}、n、D_r——意义与式（4-78）同；
k、AN_0——经验常数，取决于晴天的季节，表4-20为一些典型季节下 k 和 AN_0 值。

表 4-20 典型季节下 k 和 AN_0 值

季节	k	AN_0
夏天	1.54	26.5
春、秋	0.84	26.6
冬天	0.51	24

采用该式计算得到的是晴天平均值，适用范围：$4 \leqslant n \leqslant 8$，$r \leqslant 2.5$。

5. 日本中央电力研究院（CRIEPI）经验公式

日本中央电力研究院（CRIEPI）总结出的预估直流输电线路电晕产生的可听噪声的公式为：

$$AN = 10\frac{g_{60}}{g_{60}-g_{50}}\left(1-\frac{g_{50}}{g_{max}}\right)+50-10\lg D_r \tag{4-84}$$

$$g_{50}=\left(\frac{\lg n}{106}+\frac{\lg d}{21}+\frac{1}{2S^2}+\frac{1}{113}\right)^{-1}$$
$$g_{60}=\left(\frac{\lg n}{72}+\frac{\lg d}{21}+\frac{1}{2S^2}+\frac{1}{2538}\right)^{-1} \tag{4-85}$$

式中　r——导线半径，cm；

AN、g_{max}、n、D_r——意义与式（4-78）同；

S——极间距，m。

g_{60} 和 g_{50} 分别表示 AN_0=60、50dB（A）时导线表面最大场强，可用式（4-85）表示。

采用该式计算得到的是晴天平均值，适用范围：$1 \leqslant n \leqslant 4$，$1.12 \leqslant r \leqslant 2.47$，$8.44 \leqslant S$。

6. 同塔双回直流线路可听噪声的预估方法

同塔双回直流线路可听噪声的预估，可先分别计算双回线路每回产生的可听噪声，再将每回噪声的单位由分贝表示转换为以声压表示，将两回线路产生的声压进行叠加，得到同塔双回输电线路产生的总声压，再进行相应的转换就可以得到同塔双回输电线路产生的以分贝表示的可听噪声。

第一回线路产生的声压为：

$$P_1=10^{(AN_1)/20}\times 20\times 10^{-6} \tag{4-86}$$

式中　P_1——第一回线路产生的声压，μPa；

AN_1——第一回线路产生的可听噪声，dB（A）。

第二回线路产生的声压为：

$$P_2=10^{(AN_2)/20}\times 20\times 10^{-6} \tag{4-87}$$

式中　P_2——第二回线路产生的声压，μPa；

AN_2——第二回线路产生的可听噪声，dB（A）。

总的声压为：$P=P_1+P_2$，μPa。

总的可听噪声为：$AN=20\lg\frac{P}{P_0}$，dB（A）。

7. 海拔修正方法

国外在海拔对直流输电线路可听噪声影响方面开展的研究较少，一般参考美国 EPRI 推荐的交流线路方法来修正海拔对直流线路可听噪声的影响，即海拔每增加 1000m，可听噪声增加 3.3dB（A）。

中国电力科学研究院在北京特高压直流试验基地和西藏高海拔试验基地分别进行了 2 年多直流线路电磁环境真型试验，结果表明，从海拔 0m 到 4300m，直流线路可听噪声增加量只有按美国 EPRI 推荐的海拔修正量的 30%左右。但由于海拔及离子对导线电晕放电及其产生噪声的影响，直流线路可听噪声随海拔增加呈非线性增加，在海拔较低时的可听噪声增加量比海拔较高时的增加量大，对此科研单位正进行深入研究。目前，我国直流线路工程中暂按海拔每增加 1000m，可听噪声增加 2.2dB（A）修正。

五、可听噪声的影响因素

极间距、导线高度、子导线分裂间距、导线分裂根数和直径等因素对导线的可听噪声有一定影响。采用 EPRI 推荐公式，按表 4-21 给出的基本技术参数，计算不同情况下正极导线投影外 20m 处的晴天可听噪声 50%值（L50），如图 4-45～图 4-48，图中符号 d 表示导线直径。

表 4-21　各种电压等级基本技术参数

电压等级	±400kV	±500kV	±500kV 双回	±660kV	±800kV	±1100kV
导线铝截面积（mm²）	300～500	400～900	400～900	720～1250	630～1250	800～1250
导线直径（mm）	23.9～30	27.6～40.6	27.6～40.6	36.2～47.9	33.8～47.9	38.4～47.9
分裂根数	4	4	4	4	6	8
导线分裂间距（mm）	450	450	500	500	500	550
极间距（m）	11	13	18	18	20	26
导线高度（m）	15	17	17	21	23	31

注　1. 双回±500kV 的极间距和导线高度均指下导线，上导线的极间距考虑比下导线小 4m，层间距取 14m，导线极性排列方式为 [+–/–+]；
2. 不考虑海拔修正。

（一）不同极间距

图 4-45 给出典型直流线路在不同极间距时的可听噪声。

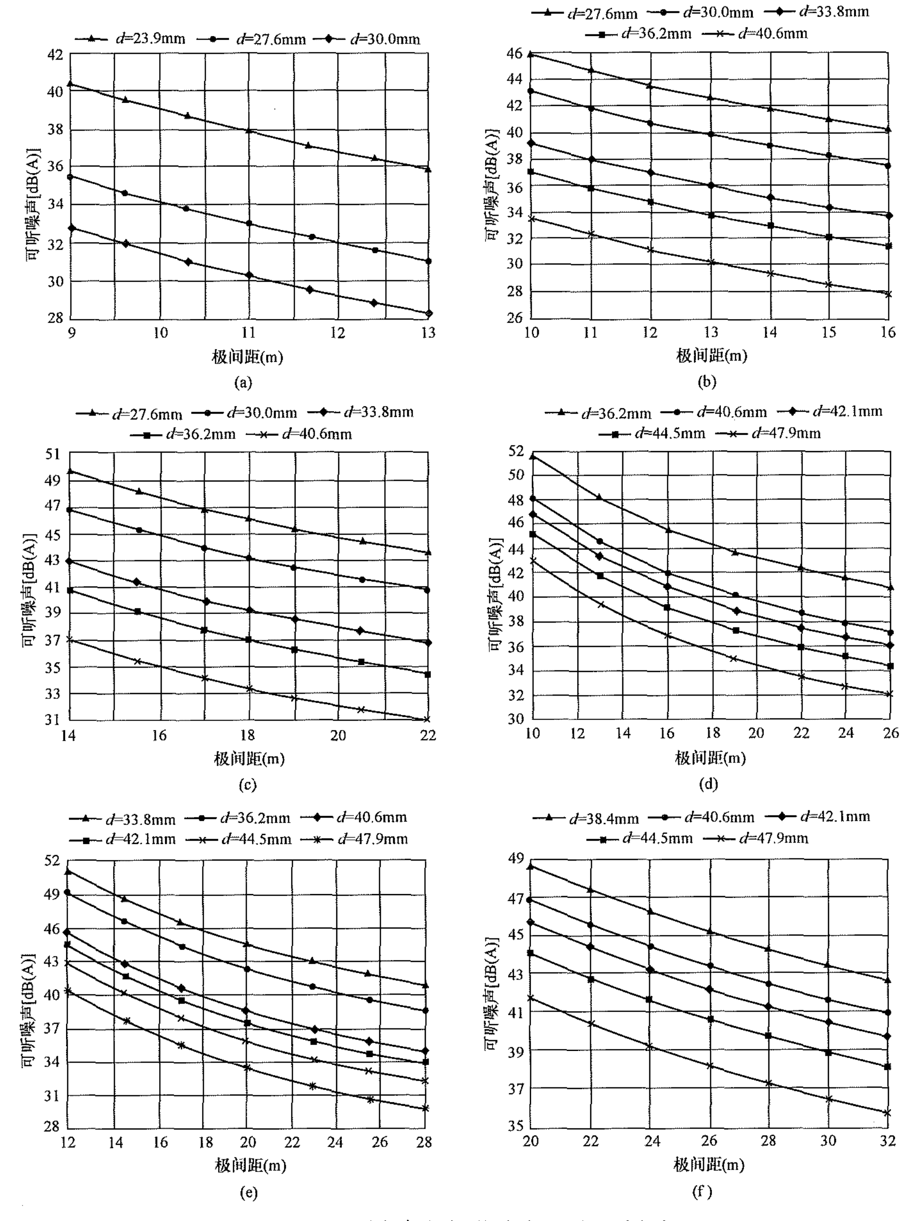


图 4-45　典型直流线路不同极间距时可听噪声

（a）±400kV 单回直流线路；（b）±500kV 单回直流线路；（c）±500kV 双回直流线路；（d）±660kV 单回直流线路；（e）±800kV 单回直流线路；（f）±1100kV 单回直流线路

由图 4-45 可知，可听噪声随着极间距增加而减小；极间距越大，减小速度越慢；随着电压等级的提升，减小速度是逐渐减慢的。可听噪声随极间距增大的变化规律详见表 4-22。

表 4-22　可听噪声随极间距增大的变化规律

回路数	电压等级	随极间距增大而减小的可听噪声值［dB（A）/m］
单回	±400kV、±500kV	0.65～1.4
单回	±660kV、±800kV	0.3～1.1
单回	±1100kV	0.35～0.65
双回	±500kV	0.54～1.05

（二）不同导线高度

图 4-46 给出典型直流线路在不同导线高度时的可听噪声。

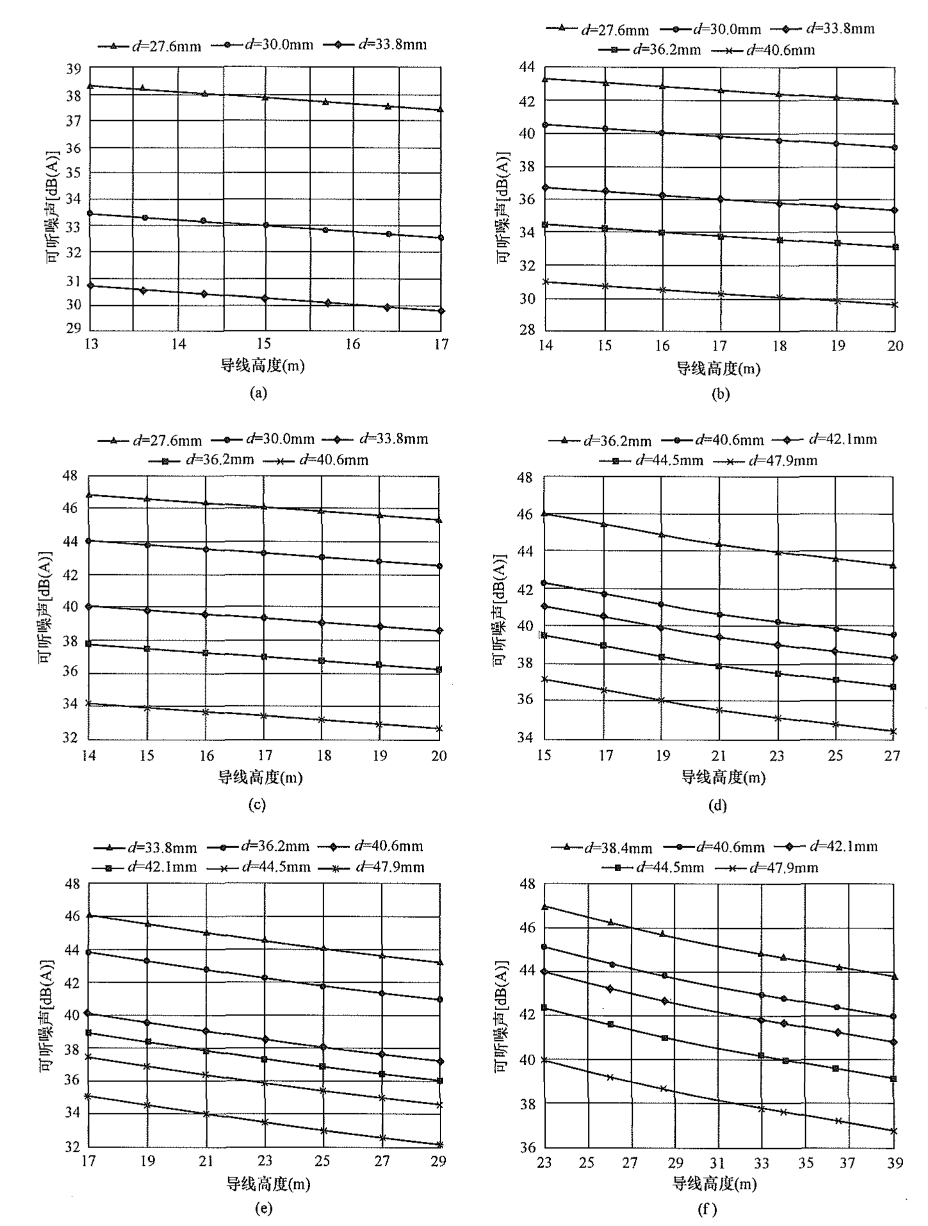


图 4-46 典型直流线路在不同导线高度时的可听噪声

（a）±400kV 单回直流线路；（b）±500kV 单回直流线路；（c）±500kV 双回直流线路；（d）±660kV 单回直流线路；（e）±800kV 单回直流线路；（f）±1100kV 单回直流线路

由图 4-46 可知，可听噪声随着导线高度增加而减小，导线高度越大，减小速度越慢；相对于极间距，导线高度变化引起变化量较小。表 4-23 给出可听噪声随导线高度的变化规律。

表 4-23 可听噪声随导线高度的变化规律

回路数	电压等级	随导线高度增大而减小的可听噪声值[dB（A）/m]
单回	±400kV、±500kV	0.2～0.29
单回	±660kV、±800kV	0.17～0.32
	±1100kV	0.15～0.26
双回	±500kV	0.2～0.29

（三）不同导线分裂间距

图 4-47 给出典型直流线路在不同导线分裂间距时的可听噪声。

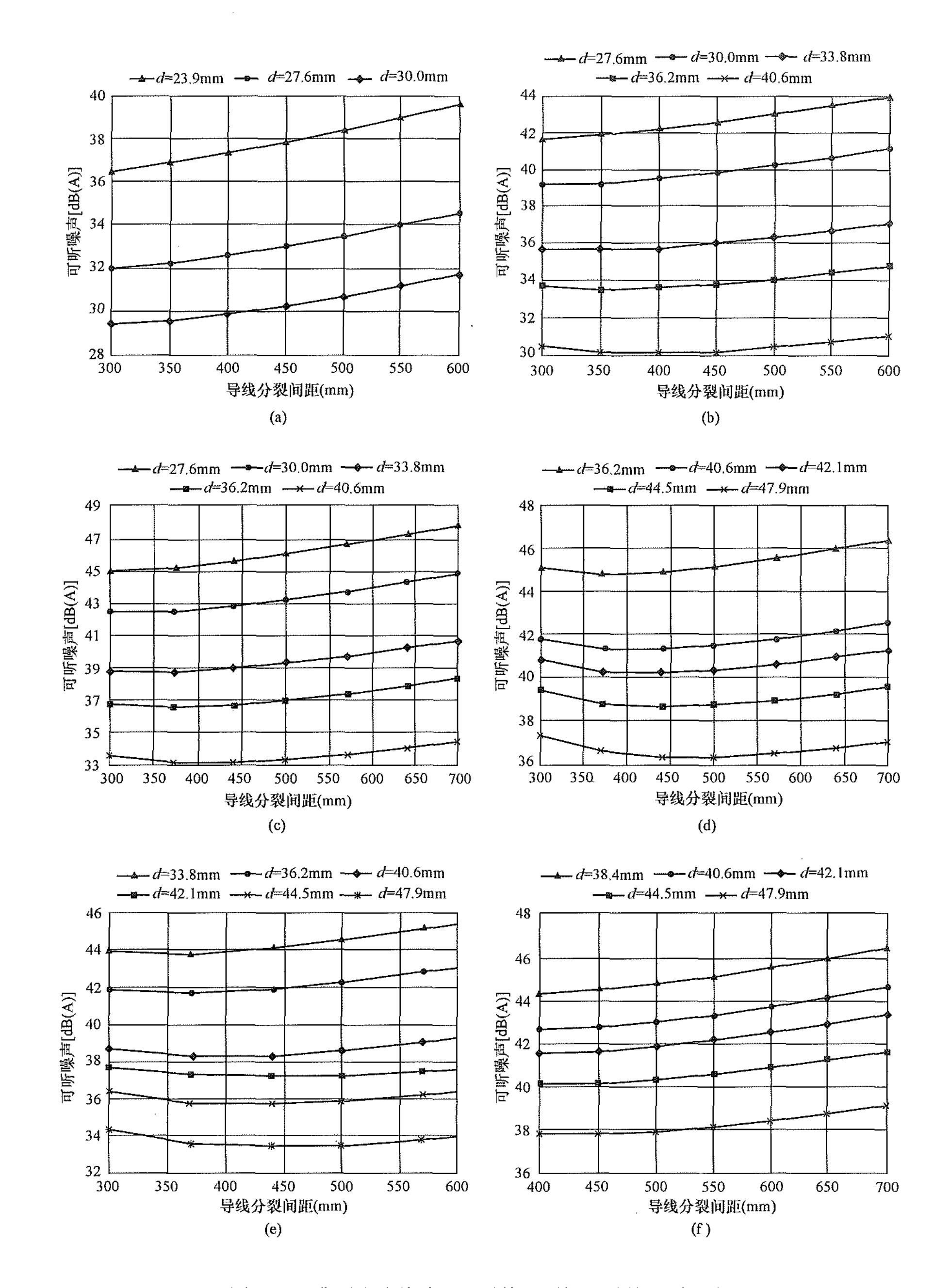


图 4-47 典型直流线路不同导线分裂间距时的可听噪声

（a）±400kV 单回直流线路；（b）±500kV 单回直流线路；（c）±500kV 双回直流线路；（d）±660kV 单回直流线路；（e）±800kV 单回直流线路；（f）±1100kV 单回直流线路

由图 4-47 可知，一般情况下，随着导线分裂间距增加，可听噪声呈先减小后增大的趋势，可听噪声随导线分裂间距的变化曲线存在一个“拐点”，“拐点”与电压等级和导线直径有关。

（四）不同导线分裂根数和直径

图 4-48 给出典型直流线路在不同导线分裂根数和直径时的可听噪声。

由图 4-48 可知，可听噪声随着导线分裂根数的增加而减小，随导线直径增大而减小。

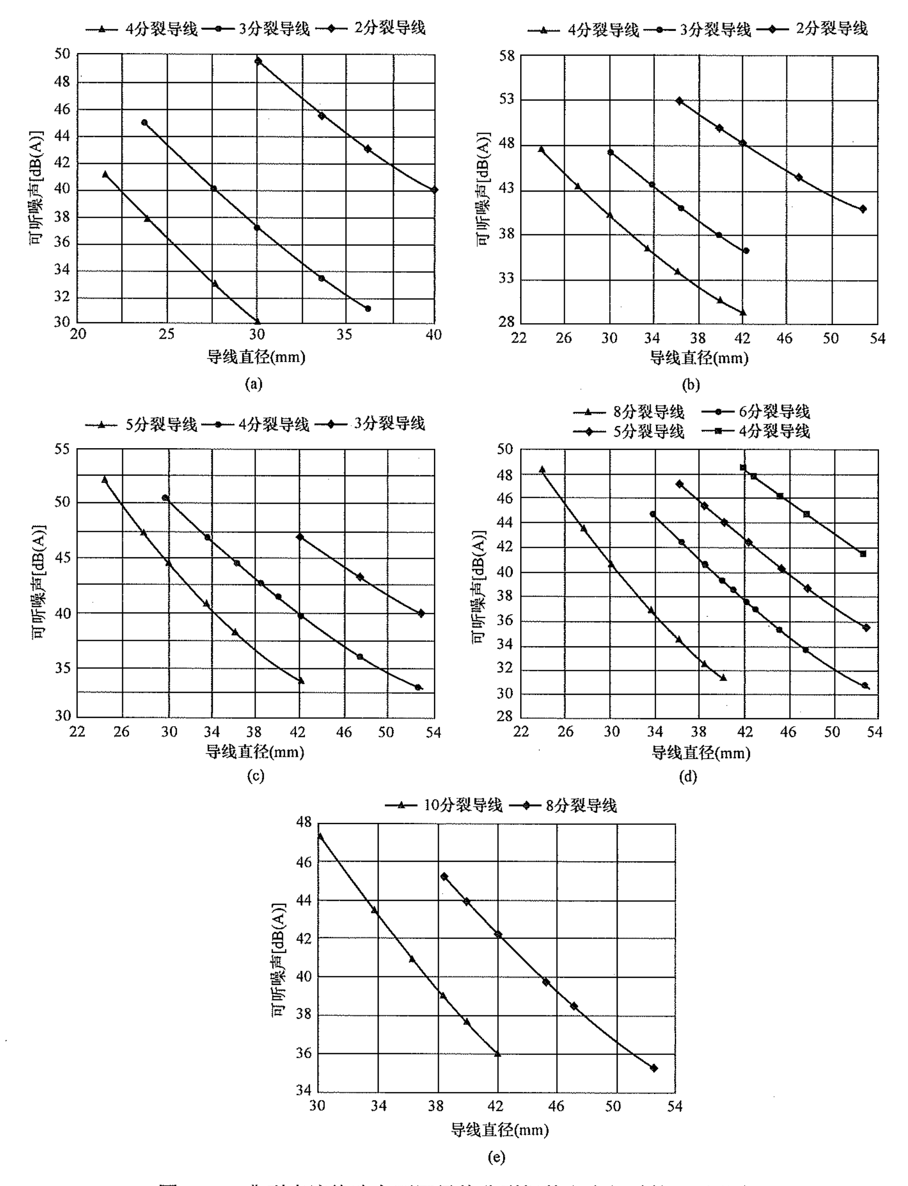


图 4-48 典型直流线路在不同导线分裂根数和直径时的可听噪声

（a）±400kV 直流线路；（b）±500kV 直流线路；（c）±660kV 直流线路；（d）±800kV 直流线路；（e）±1100kV 直流线路

六、算例

已知单回双极线路参数如下：额定电压±800kV，导线型式为 6×JL/G1A-720/50，单根导线直径为 36.2mm，分裂间距 450mm，导线极间距为 20m，导线平均高度为 23m，导线表面最大电场强度为 22.54kV/cm。计算±800kV 单回直流输电线路距正极性导线对地投影外 20m 处的可听噪声。

（1）EPRI 计算法。

正极性导线到计算点之间的距离为：$D_r=\sqrt{20^2+23^2}=30.48$m

导线为 6 分裂，$k_n=0$

根据式（4-78）得到夏季晴天可听噪声的 50%值为：

$$AN=56.9+124\lg\left(\frac{g_{max}}{25}\right)+25\lg\left(\frac{d}{4.45}\right)+18\lg\left(\frac{n}{2}\right)-10\lg D_r-0.02D_r+k_n$$

$$=56.9+124\lg\left(\frac{22.54}{25}\right)+25\lg\left(\frac{3.62}{4.45}\right)+18\lg\left(\frac{6}{2}\right)-10\lg(30.48)-0.02\times30.48$$

$$=42.23[\text{dB(A)}]$$

（2）BPA 计算法。

根据式（4-80）得到：$d_{eq}=36.2\times0.66\times6^{0.64}=75.2$mm

根据式（4-79）得到春秋季节好天气时可听噪声

的50%值：

$$AN = -133.4 + 86\lg g_{max} + 40\lg d_{eq} - 11.4\lg D_r$$
$$= -133.4 + 86\lg 22.54 + 40\lg 75.2 - 11.4\lg 30.48$$
$$= 41.09[dB(A)]$$

第七节　绝　缘　配　合

直流线路的绝缘配合应使线路在正常运行电压（工作电压）、内过电压（操作过电压）及外过电压（雷电过电压）等条件下安全可靠的运行，具体设计内容是确定绝缘子型式及片数，以及在相应工况的风速下导线对杆塔的空气间隙距离。

一、直流线路绝缘子电气特性

在直流电压的作用下，绝缘子的电弧发展及污秽特点均与交流不同。交流电流具有过零、电弧重燃和恢复等特点，直流电流不存在类似现象；直流线路具有恒定的正负极和明显的吸尘现象。因此，绝缘子的直流电气特性与交流有明显差异。

（一）直流线路绝缘子的积污特性

在交流电场下，绝缘子是否带电，其表面的积污量差异不太明显。但在直流恒定电场的作用下，绝缘子表面的积污量约为交流作用时的1.5～2倍。

直流线路导线和杆塔间的场强分布不均匀，导致绝缘子串的每一片绝缘子上的电位梯度不同，并出现两端高、中间低的现象。绝缘子串两端场强的集中效应使端部吸附尘粒的电场力增强，端部污秽更为严重。

直流线路绝缘子（串）特有的积污特性，是影响污闪特性的重要因素，也容易出现水泥膨胀、钢脚电极腐蚀等问题。

（二）直流线路绝缘子的污闪特性

直流线路绝缘子在污闪过程中，存在着严重的飘弧现象，容易引起绝缘子伞裙间及片间电弧短接，与交流线路相比，直流线路绝缘子的污闪电压较低。

美国EPRI的试验结果表明，盘形绝缘子串的直流污闪电压比交流低50%。日本NGK公司的试验结果表明，支柱绝缘子在盐密0.1mg/cm^{2}时的直流污闪电压比交流低36%～43%。重庆大学对多种绝缘子的污闪特性研究表明，在盐密0.03mg/cm^2～0.2mg/cm^{2}时，直流污闪电压比交流低15%～30%，污秽越严重，污闪电压差值越大。

（三）直流线路绝缘子污闪电压与极性的关系

与交流相比，绝缘子直流污秽闪络特性具有明显的极性效应，负极性临界污闪电压比正极性低10%～20%，早期BPA、NGK、东京电力工业中央研究所的相关试验均验证了这一结论。

清华大学对污秽绝缘子在正、负极性直流电压作用下污闪电压差异的研究指出：负极性电弧燃烧比较稳定，持续时间较长，容易造成桥络。而正极性电弧不稳定，持续时间较短，不易形成稳定桥络，同时正电弧较易飘离，电弧的飘离使弧柱拉长，弧压降增大。

绝缘子污闪特性试验一般采用负极性，是一种偏严格的试验方法。

二、直流线路绝缘子型式

直流线路绝缘子与交流有较大差别，主要是因为直流具有积尘效应、电弧易在棱间桥接、绝缘材料易老化及金具构件易电解腐蚀等特点，因此对直流线路绝缘子的爬电距离、形状及材料等提出了更高的技术要求。

（一）盘形悬式绝缘子

盘形悬式绝缘子一般分瓷和玻璃两种。瓷绝缘子的绝缘部件是氧化铝陶瓷，具有优良的抗老化能力和化学稳定性，外力冲击时不易破碎，表面釉可阻止电弧的蚀刻；盘形玻璃绝缘子是以钢化玻璃为绝缘体，具有强度大、热稳定性高、不易老化的特点，同时由于玻璃绝缘子具有零值自爆的特点，可以减轻维护检测工作量。

与交流线路相比，直流线路盘形悬式绝缘子的主要技术特点有：

（1）盘径大和爬距大。如通用的160kN和210kN直流线路绝缘子采用320mm的盘径，标称爬距达到545mm，爬高比为3.21。与相同结构高度的交流线路标准型盘形绝缘子相比，爬距增加很多。

（2）长短交错棱布置。如直流线路钟罩型盘形绝缘子伞裙的下表面采用长短棱交错布置，使得相邻两棱端间的空气间隙增加，同时第二道棱较为陡峭，可有效抑制局部电弧的伸展。

（3）体积电阻率高。直流电压下瓷和玻璃介质中钠离子的定向迁移会引起绝缘件的损坏。同时，瓷和玻璃介质中的杂质在直流电压作用下产生的热应力也会引起温升，导致介质局部膨胀而发生击穿。因此，直流线路绝缘子的体积电阻率要求较高，均应进行离子迁移试验和热破坏试验。

（4）安装防腐锌套。直流线路绝缘子腐蚀主要表现为钢脚腐蚀，当钢脚经过泄漏电流时，不断发生氧化反应和腐蚀，使得机械强度降低。同时在钢脚和混凝土的接触部位形成的腐蚀物堆积，产生的机械应力会引起瓷件破裂。因此，为防止钢脚的腐蚀，直流线路绝缘子都安装有防腐锌套，在重污秽地区还应适当提高锌套的设计标准。

直流线路绝缘子V形布置时，钢帽也易出现电腐蚀现象，安装锌环是一种抑制腐蚀的有效措施。

（二）复合绝缘子

复合绝缘子一般由伞裙、护套、芯棒和端部金具组成。其中伞裙护套由有机合成材料硅橡胶制成，芯棒一般是由玻璃纤维作为增强材料、环氧树脂作为基体的玻璃钢复合材料。复合绝缘子是一种不可击穿型绝缘子，硅橡胶的憎水性和憎水性迁移使得复合绝缘子具有很好的耐污性能，免清扫，运行维护方便。

与交流线路相比较，直流线路复合绝缘子的主要技术要求有：

（1）直流电弧对硅橡胶的电蚀损比交流电弧要严重得多，复合绝缘子伞裙与护套的设计（包括材质和结构）应能防止直流电弧的电蚀损与灼伤；

（2）在持续潮湿条件下，硅橡胶表面憎水性会暂时减弱而导致泄漏电流剧增，应对端部金具采取防腐措施，如加装防电解腐蚀的阳极保护电极；

（3）加强芯棒护套与端部金具连接区的密封层，以抵御直流电弧的灼损；

（4）芯棒应具有尽可能小的离子迁移电流和较高的耐弱酸侵蚀能力；

（5）外绝缘表面应有比交流更大的爬电比距和适当的伞间距。

（三）长棒形瓷绝缘子

长棒形瓷绝缘子由瓷棒体和端部铁帽组成，结构较为简单。瓷棒体是由氧化铝高强度瓷棒整体烧制而成的，具有很高的强度；瓷棒体与端部铁帽之间可采用铅锑合金胶合剂（铅的质量分数为95%）浇注连接，膨胀系数小。

长棒形瓷绝缘子是不可击穿型，无须检测零值；伞型结构为敞开式的空气动力型，自清洗能力强。因此，长棒形瓷绝缘子具有耐污性能较好、自清洗能力强、运行维护简便等特点。

（四）盘形瓷/玻璃复合绝缘子

瓷/玻璃复合绝缘子是近年来发展起来的新型绝缘子，主要有两种形式：

一种形式是由钢脚、铁帽、瓷/玻璃芯和复合伞裙组成，其吸取了瓷/玻璃绝缘子和复合绝缘子的各自特点。与传统盘形绝缘子一样，瓷/玻璃复合绝缘子的钢脚、铁帽与瓷/玻璃芯间采用了胶装结构，从而具有稳定可靠的机械拉伸强度；不同的是，瓷/玻璃复合绝缘子除钢脚、铁帽和芯盘外，还具有模压成型的硅橡胶复合外绝缘伞裙，可有效提高耐污性能，污闪电压可比相同类型的传统盘形绝缘子提高70%以上，同时复合伞裙有良好的耐冲击性能，也减少了绝缘子因外力或环境温差骤变而导致的爆裂概率。

另一种形式是在传统的盘形瓷/玻璃绝缘子表面涂覆室温硫化硅橡胶（RTV）涂料，改变绝缘子表面的状况，使其由亲水性变为憎水性，从而提高绝缘子的耐污性能。RTV涂料可在生产工厂或者安装现场进行涂覆。

（五）直流绝缘子型式选择

复合绝缘子耐污性能好，在同样的污秽条件下，串长较盘形绝缘子串长明显缩短，可有效减小塔头尺寸；自从第一条±500kV直流线路葛—南线（1993年）试用了24支后，复合绝缘子在直流线路上逐渐推广使用，经过几十年的发展、试用、检测和改进，其质量可以达到较高水平；复合绝缘子的制造成本低，相比盘形绝缘子具有较为明显的价格优势。目前，复合绝缘子主要在一般气象区的悬垂串上大量使用，最近建设的特高压直流线路（如普—侨、云—广、哈—郑直流工程）的耐张串也进行了局部试用。

盘形瓷/玻璃绝缘子的使用历史悠久，运行经验丰富，制造和检测手段齐全，技术成熟，质量稳定，瓷绝缘子可做到其运行劣化率不大于十万分之五，玻璃绝缘子可做到其年均自爆率不大于万分之一。虽然随着复合绝缘子的推广，盘形绝缘子的使用率有所降低，但由于优良的机械特性，在耐张串和重冰区悬垂串上，仍然主要采用盘形绝缘子。

长棒形瓷绝缘子在国外具有很长的制造应用历史，近年来在我国电网中逐渐采用；瓷/玻璃复合绝缘子是一种新型绝缘子，近年来在我国输电线路上开始挂网运行。

（六）直流线路盘形绝缘子电腐蚀抑制措施

直流线路盘形绝缘子的金具存在着电解腐蚀现象：正极性导线的绝缘子腐蚀钢脚，负极性导线的绝缘子腐蚀铁帽。因此，为保证直流线路的运行安全，要求盘形绝缘子具有钢脚、铁帽的防电腐蚀措施。

1. 铁帽防腐锌环

绝缘子铁帽与瓷面之间的缝隙处容易汇聚液体，液体桥接了铁帽与瓷面间的缝隙，形成了铁帽—液体—瓷面—钢脚的泄漏电流路径。对于直流输电线路负极性侧的绝缘子，铁帽作为电解回路的阳极，在电解过程中会因大量失去电子而被腐蚀。

绝缘子串I形布置时，泄漏电流沿绝缘子表面均匀分布，铁帽的帽口边缘电流密度小，腐蚀相对较为轻微。而绝缘子串V形布置时，由于绝缘子串的倾斜，受潮绝缘子的轴向下边缘局部泄漏电流较大，导致局部电腐蚀现象比I形串严重。电压等级越高，铁帽电腐蚀现象越严重。根据对已建直流线路绝缘子运行情况的初步统计，在未采取抑制措施的情况下，±500kV直流线路盘形绝缘子铁帽发生电腐蚀的比例为1%～3%，西南潮湿地区的±800kV直流盘形绝缘子铁帽发生电腐蚀的比例则高达80%。

轻微电腐蚀时，盘形绝缘子的电气、机械特性仍

可满足线路运行要求，但随着泄漏电流的增大和电腐蚀的加速发展，绝缘子电气、机械性能会明显下降，严重时将影响线路的安全稳定运行。

在绝缘子铁帽与瓷面的缝隙处安装锌环是一种较为有效的抑制铁帽电腐蚀的措施。安装锌环后，由于锌的电化学活性强于铁，可以作为牺牲阳极替代铁腐蚀。另外，锌环位于铁帽与瓷面的缝隙处，液体直接接触锌环，泄漏电流的路径可变为铁帽—锌环—液体—瓷面—钢脚，锌环代替铁帽与瓷面液体构成电解回路，从而也减少了铁帽的电腐蚀。

2. 钢脚防腐锌套

直流电压下的钢脚腐蚀一般发生于正极性侧。随着钢脚的电腐蚀，直径横截面逐渐减小，机械强度降低。钢脚与水泥接触部位由于电解产物（如各类锌盐和碱类）的体积膨胀，形成应力通过胶装水泥传递到瓷或玻璃件，导致瓷或玻璃件破裂。

在盘形绝缘子钢脚上加装锌套作为“牺牲电极”是一种较为有效的防腐措施，在发生电解腐蚀时，锌套由于具有较大的电化学势而首先被电解，从而保护了钢脚本体，如图 4-49 所示。

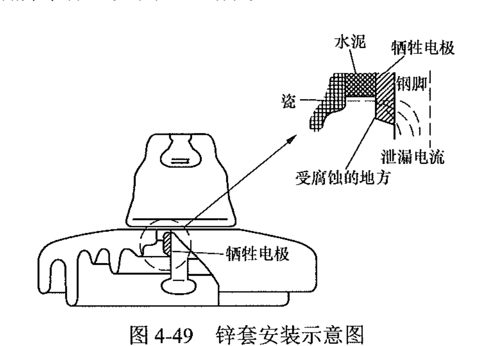


图 4-49　锌套安装示意图

三、直流线路绝缘子片数（长度）选择

直流线路绝缘子片数（长度）选择方法一般有两种：一种是按照污秽条件下绝缘子串的污闪电压来选择，即污耐压法；另一种是按污秽条件下绝缘子串的爬电比距（λ）来选择，即爬电比距法。这两种方法都是以线路允许的污闪事故率为基础进行计算。

（一）地区污秽等级的确定

地区污秽等级主要根据地区的污、湿特性，运行经验以及绝缘表面污秽物的等值附盐密度（简称盐密）三个因素综合考虑确定。对于交流输电线路，按照现行污区分布图，结合现场污秽调查确定污秽等级。而对于直流输电线路，我国尚未对直流污区图的绘制作出明确规定，污区划分一般均参照交流线路的污区分布图，并结合沿线污秽调查和运行经验，分为清洁区、轻污区、中污区和重污区，表 4-24 给出了直流线路污区对应的盐密取值。

表 4-24　　直流线路污区划分

直流线路污区	清洁区	轻污区	中污区	重污区
盐密（mg/cm²）	0.03	0.05	0.08	0.15

（二）工作电压下的盘形绝缘子片数

1. 污耐压法

污耐压法是在现场污秽调研和试验研究的基础上，充分考虑污秽成分、上下表面污秽不均匀、灰密等因素对绝缘子污闪电压的影响，并考虑试验分散性后选择绝缘子片数的方法。

换句话说，污耐压法是根据人工污秽试验获得的实际绝缘子在不同污秽程度下的污闪电压来选择绝缘子片数，使绝缘子串的污闪电压大于线路的最高运行电压，并留有一定的安全裕度。在设计中要考虑人工污秽试验与自然污秽情况的等价性的问题，通过考虑灰密、污秽分布和盐的种类等因素的影响，对人工污秽试验结果进行修正来满足实际工程要求。

我国早期的直流线路工程在选择绝缘子片数时，设计大都采用日本 NGK 基于其试验数据推荐的绝缘子污耐压计算方法；近年来，中国电力科学研究院和国内其他一些研究机构根据试验情况，也提出了相应的绝缘子污耐压计算方法。这些绝缘子污耐压计算方法原理是一致的，仅在修正系数的取值上稍有差别，表 4-25 给出了主要的几种绝缘子污耐压计算方法。其中，中国电力科学研究院推荐的方法被广泛应用在特高压直流线路工程设计中。

表 4-25　　主要的几种绝缘子污耐压计算方法

提出单位	配置公式	灰密修正系数 K_1	上下表面不均匀修正系数 K_2	盐密修正 K_3	多串修正 K_4
早期各设计院	$N=\dfrac{KU_N}{K_1K_2U_{50\%}(1-3\sigma)}$	$K_1=\left(\dfrac{NSDD}{0.1}\right)^{-0.12}$	$K_2=1-A\lg(T/B)$ $A=0.38$	—	—
中国电力科学研究院	$N=\dfrac{KU_N}{K_1K_2U_{50\%}(1-3\sigma)}$	$K_1=0.98(NSDD)^{-n}$ $n=0.25(ESDD)^{0.15}$	$K_2=1-A\lg(T/B)$ 当 $ESDD\leqslant0.1$mg/cm² 时，$A=0.2$； 当 $ESDD>0.1$mg/cm² 时，$A=0.3$	—	—

续表

提出单位	配置公式	灰密修正系数 K_1	上下表面不均匀修正系数 K_2	盐密修正 K_3	多串修正 K_4
重庆大学	$N=\dfrac{KU_N}{K_2U_{50\%}(1-3\sigma)}$	—	$K_2=1-A\lg(T/B)$ $A=0.38$	—	—
清华大学深圳研究生院	$N=\dfrac{KU_N}{K_1K_2K_3(1-3\sigma)U_{50\%}}$	$K_1=0.99(NSDD)^{-0.13}$	$K_2=1-A\lg(T/B)$ 当 $ESDD$≤0.08，A=0.47； $ESDD$>0.08，A=0.53	$K_3=1+1.49R^{1.624}$ 其中 R=0.5	0.94

注 N——绝缘子片数；

U_N——额定电压，kV；

K——最高工作电压倍数；

$U_{50\%}$——单片绝缘子污闪电压，kV；

$ESDD$——等值盐密，mg/cm²；

$NSDD$——灰密，mg/cm²；

T/B——绝缘子上下表面积污比。

（1）绝缘子的人工污秽闪络试验。

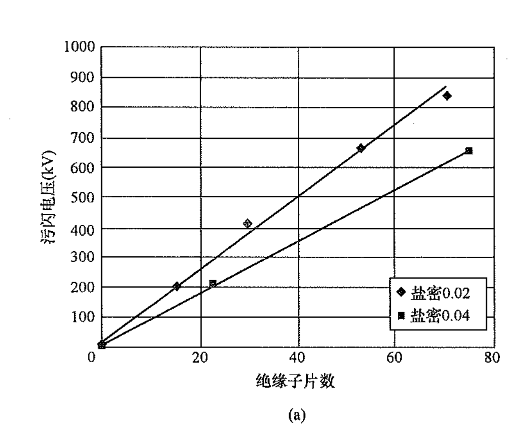
人工污秽试验方法一般有盐雾法、固体层法和带电积尘法三种。其中，IEC 1245 规定的标准方法是盐雾法和固体层法；我国行业标准目前只规定了固体层法。

法国 SEDIVER 使用上述三种试验方法对包括瓷、玻璃和合成材料在内的数十个绝缘子进行试验，给出了不同试验方法下耐污性能最好的几种绝缘子的试验数据。其结论是：用不同试验方法得出的绝缘优劣顺序完全不同，即三种试验方法不等效。

同样是采用固体层法，由于施加电压方式的不同，试验结果也会有很大差别。通常的加压方式主要有升压法、雾中耐受法、升降法和重复闪络法。中国电力科学研究院给出了传统直流钟罩型盘形绝缘子在上述四种加压方法下的比较结果：升压法求得的污闪电压最高，其次是升降法和重复闪络法，雾中耐受法得到的污闪电压最低。试验方法建议首选升降法，如果试验工作量太大也允许采用升压法。

（2）污闪电压与串长的关系。

从目前国内外的研究成果来看，在±800kV 直流电压及以下（串长小于 12m），绝缘子串污闪电压与串长呈线性关系，如图 4-50 所示。



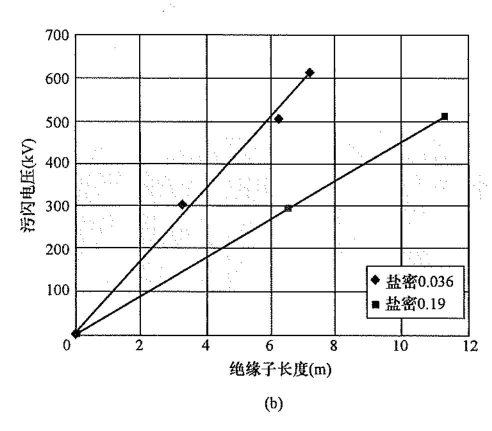
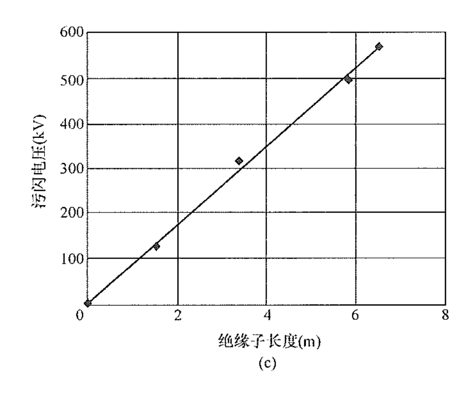


图 4-50 直流绝缘子串污闪电压与串长关系试验数据（一）
（a）美国试验数据；（b）意大利试验数据



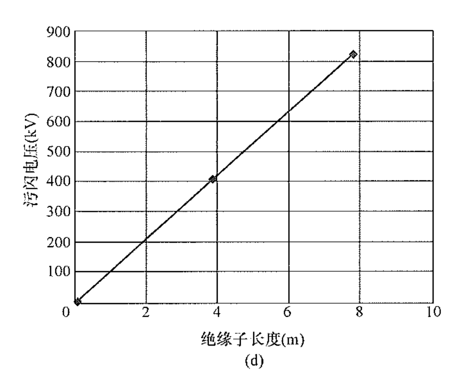


图 4-50 直流绝缘子串污闪电压与串长关系试验数据（二）

（c）日本 NGK 试验数据；（d）STRI 试验数据（盐密/灰密 =0.05/0.3mg/cm²）

中国电力科学研究院对悬垂串 300kN 级 60 片钟罩型盘形绝缘子和 45 片三伞形盘形绝缘子在相同盐密和灰密条件下分别进行了直流人工污秽试验，结果表明：盘形绝缘子串的污闪电压与片数成正比。

清华大学在 0.03mg/cm²～0.2mg/cm² 下（盐灰比为 1:6）对 XZP1-300 钟罩型瓷绝缘子进行了不同串长的试验，试验布置如图 4-51 所示。试验得出在不同盐密条件下，污闪电压与串长呈现良好的线性关系，如图 4-52 所示。

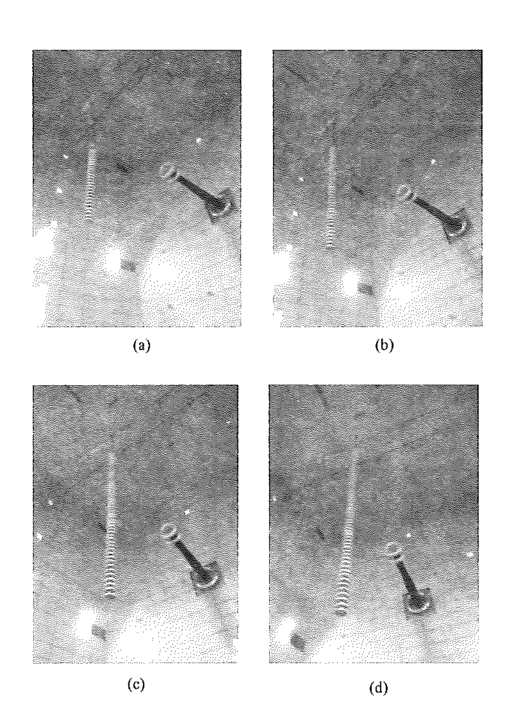


图 4-51 瓷绝缘子不同串长悬挂布置图（一）

（a）25 片；（b）40 片；（c）56 片；（d）72 片

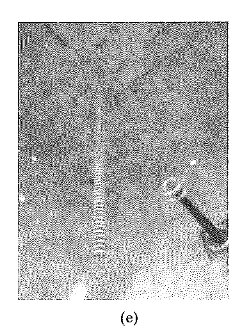


图 4-51 瓷绝缘子不同串长悬挂布置图（二）

（e）85 片

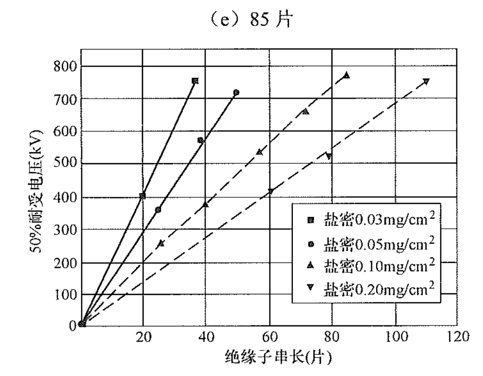


图 4-52 不同盐密下长串瓷绝缘子污闪电压与串长关系

因此，在实际工程应用时，直流线路绝缘子整串的污闪电压，可根据单片绝缘子的耐污特性，考虑一定系数后进行线性外推。

（3）污闪电压与盐密的关系。

当灰密保持不变时，绝缘子饱和受潮后吸附的水量是一定的。在盐密处于较低水平时，随着盐密的增大，可溶出的盐分增多，电导率增大，绝缘子污闪电压下降较多。当盐密处于较高水平，即当液体中含盐量已经较高时，继续增大盐量，可溶出盐的增量减少，电导率趋向于平缓，绝缘子污闪电压下降较少。

绝缘子直流人工污秽闪络电压 $U_{50\%}$与盐密 *ESDD*

的关系可按式（4-88）计算。

$$U_{50\%}=A\times(ESDD)^{-a} \quad (4\text{-}88)$$

式中 A——由绝缘子材质和结构决定的常数；

a——污秽对污闪电压 $U_{50\%}$影响的特征指数。

1）中国电力科学研究院提供的国产 XSP-210 型绝缘子污闪电压 $U_{50\%}$ 与试验盐密 $ESDD$ 的关系可按式（4-89）计算。

$$U_{50\%}=3.36ESDD^{-0.378} \quad (4\text{-}89)$$

2）清华大学在海拔 2100m 地区进行了特高压直流线路全尺寸悬式瓷、玻璃绝缘子的直流污闪特性试验，试验灰密取 1.0mg/cm²，试验用的各类型绝缘子污闪电压 $U_{50\%}$ 与试验盐密 $ESDD$ 之间的关系可按式（4-90）～式（4-93）计算。

XZP-300（瓷）：$U_{50\%}=2.99ESDD^{-0.51}$ （4-90）

XZSP-300（瓷）：$U_{50\%}=3.31ESDD^{-0.49}$ （4-91）

FC400（玻璃）：$U_{50\%}=3.36ESDD^{-0.42}$ （4-92）

FC530P（玻璃）：$U_{50\%}=4.21ESDD^{-0.39}$ （4-93）

3）日本提供的 CA-745EZ（210kN）型绝缘子直流污闪电压 $U_{50\%}$ 与试验盐密 $ESDD$ 的关系可按式（4-94）计算。

$$U_{50\%}=5.98ESDD^{-0.308} \quad (4\text{-}94)$$

4）自然污秽试验的污闪电压一般要高于人工污秽试验，且数据分散性很大，除灰密和污秽分布不均匀的影响外，盐类成分起了主要作用。多种复合盐染污的绝缘子污闪电压要高于氯化钠，根据单一氯化钠染污绝缘子的污闪特性进行绝缘设计是保守的。CIGRE 518《Outdoor Insulation in Polluted Conditions: Guidelines for Selection and Dimensioning》（简称 CIGRE 518）给出了不同成分盐密对污闪电压的影响曲线，如图 4-53 所示。

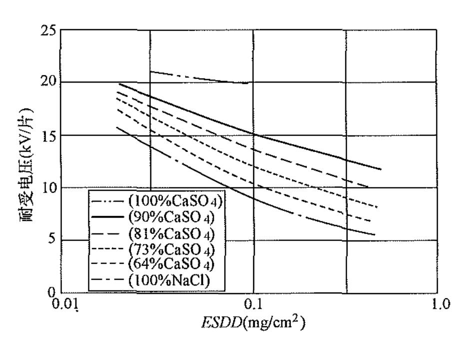


图 4-53 不同成分盐密对污闪电压的影响曲线

5）我国早期直流线路没有足够的绝缘子污闪电压数据，大都采用了 NGK 提供的直流绝缘子 CA-735EZ 的污耐压值进行计算，见表 4-26。

表 4-26 单片 CA-735EZ 绝缘子的污耐压值 kV

ESDD (mg/cm²)	0.03	0.05	0.08	0.15	备 注
污闪电压 (kV)	13.5	11.9	9.8	7.9	1986 年日本在 CIGRE 报告
	17.8	15.2	13.2	10.7	1989 年 NGK 提供葛—南使用
	15.01	12.72	10.86	9.08	2000 年 NGK 提供龙—政使用
	14.7	12.7	11.0	9.0	2000 年日本±500 阿纪线用
	17.7	15.0	12.8	10.7	2002 年 NGK 提供贵—广使用

注 1. 所有数据灰密为 0.1mg/cm²。
2. 葛—南数据为砥石粉土，按 4 次耐压法得出。
3. 龙—政数据为高岭土，按升降法得出。

（4）污闪电压与灰密的关系。

灰密的增加会增大污秽饱和湿润时吸附的水量，增加导电物质的溶解程度，从而提高绝缘子的表面电导率，使绝缘子的污闪电压降低。而当灰密增大到一定程度后，导电物质已经完全溶解，灰密再增加，吸附的水分再多，对提高电导率变的不明显，污闪电压的下降逐渐呈饱和趋势。

绝缘子污闪电压灰密修正系数 K_1 可按式（4-95）计算。

$$K_1=B(NSDD)^{-b} \quad (4\text{-}95)$$

式中 B——绝缘子材质和结构决定的常数；

b——污秽对污闪电压 $U_{50\%}$影响的特征指数。

1）国内按照国家标准进行的污秽试验所使用的灰密为 1mg/cm²，绝缘子污闪电压的灰密修正系数 K_1 可按式（4-96）计算。

$$K_1=0.996NSDD^{-0.123} \quad (4\text{-}96)$$

2）中国电力科学研究院给出了常压下 210kN 钟罩型瓷绝缘子的灰密修正关系式，其是与盐密有关的幂函数，如式（4-97）所示。

$$K_1=0.98NSDD^{-n} \quad (4\text{-}97)$$

式中 $n=0.25ESDD^{0.15}$。

3）在海拔为 1970m 的云南电力试验研究院超高压试验基地，清华大学与南方电网科研院采用相同 $ESDD$（0.05mg/cm²）、不同 $NSDD$（等值灰密）条件，试验得到 XZP1-300 绝缘子直流污闪电压与灰密的关系曲线，如图 4-54 所示。

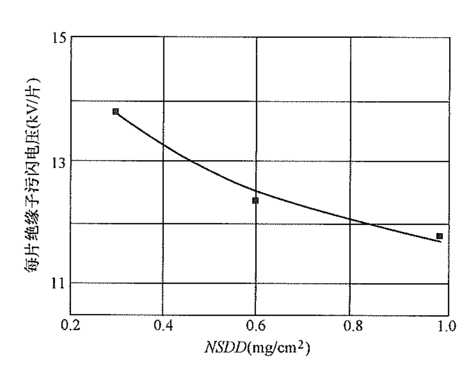


图 4-54 灰密对直流污闪电压影响曲线

污闪电压的灰密修正系数 K_1 可按式（4-98）计算。

$$K_1=0.99NSDD^{-0.13} \quad (4\text{-}98)$$

4）DL 5497—2015 和 GB 50790—2013 均提出了绝缘子直流污闪电压与灰密的–0.12 次方成比例降低，该修正方法在我国早期直流线路设计中被广泛应用。

5）国外绝缘子污闪电压长串试验数据都是在轻灰密（0.1mg/cm²）条件下得到的，污闪电压的灰密修正系数 K_1 可按式（4-99）计算。

$$K_1=0.73NSDD^{-0.13} \quad (4\text{-}99)$$

6）根据图 4-55 所示的国际上主要研究机构的绝缘子污闪电压试验数据，CIGRE 518 提出了灰密修正系数 K_1 可按式（4-100）计算。

$$K_1=\left(\frac{NSDD}{NSDD_0}\right)^{-0.106} \quad (4\text{-}100)$$

式中：$NSDD_0$=0.1mg / cm²。

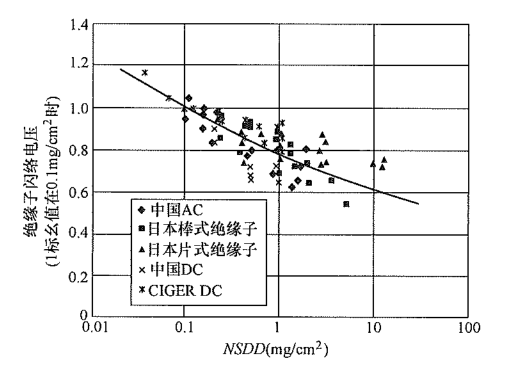


图 4-55 灰密对直流污闪电压的影响

（5）污闪电压与上、下表面积污比的关系。

运行中的绝缘子上、下表面积聚的污秽物是非常不均匀的，上、下表面积污比（T/B）一般为 1:5～1:10，最高可达 1:20。当上、下表面积污比（T/B）为 1:5 时，绝缘子污闪电压比污秽均匀分布时的污闪电压提高约 30%；上、下表面积污比（T/B）为 1:10 时，污闪电压提高约 50%。

我国设计直流输电线路时，绝缘子上、下表面积污比（T/B）一般按表 4-27 所示取值。

表 4-27 直流线路绝缘子上、下表面污秽比值

盐密（mg/cm²）	0.03	0.05	0.08	0.10	0.15
灰密（mg/cm²）	0.18	0.30	0.48	0.60	0.90
上、下表面积污比（T/B）	1:3	1:5	1:8	1:10	1:10

污闪电压绝缘子上、下表面污秽分布不均匀修正系数可按式（4-101）计算。

$$K_2=1-A\lg(T/B) \quad (4\text{-}101)$$

式中 K_2——绝缘子上、下表面污秽不均匀分布修正系数；

T——绝缘子上表面盐密值，mg/cm²；

B——绝缘子下表面盐密值，mg/cm²；

A——常数，跟绝缘子型式和盐密有关，一般可取 0.21～0.49。

中国电力科学研究院建议当 $ESDD$≤0.1mg/cm² 时，A 取 0.2；当 $ESDD$>0.1mg/cm² 时，A 取 0.3。清华大学在高海拔地区对直流线路 XZP1-300 绝缘子试验结果表明：当 $ESDD$≤0.08mg/cm² 时，A 取 0.47；当 $ESDD$>0.08mg/cm² 时，A 取 0.53。美国电科院根据相关试验，建议 A 取 0.38，该系数在我国早期直流线路设计上被广泛应用。

CIGRE 518 对于绝缘子上、下表面积污比修正系数的研究成果如下：对于 NON-HTM（非憎水性转移型）绝缘子，A 取值为 0.4；对于 HTM 绝缘子，A 可以近似为 0.15。

（6）绝缘子片数的选择。

绝缘子的自然积污情况比较复杂，运行线路的绝缘子表面盐密、灰密及上下表面积污情况等与人工污秽实验室的试验条件并不完全相同，绝缘子片数的计算一般可在试验数据的基础上，综合考虑上述各种因素的影响，估算出自然污秽条件下单片绝缘子的污闪电压，以进行外绝缘设计。

绝缘子片数可按式（4-102）计算。

$$N=\frac{KU_N}{U'_{50\%}(1-n\sigma)} \quad (4\text{-}102)$$

式中 N——绝缘子片数；

U_N——系统额定电压，kV；

K——最高工作电压倍数，±400kV、±500kV 和±660kV 为 1.03，±800kV 和±1100kV 为 1.02；

$U'_{50\%}$——绝缘子的单片污闪电压修正值，kV；

σ——绝缘子污闪电压的标准偏差，一般取 7%；

n——标偏倍数。

绝缘子的单片污闪电压修正值$U'_{50\%}$可按式（4-103）计算。

$$U'_{50\%}=U_{50\%}K_1K_2 \quad (4\text{-}103)$$

式中 $U_{50\%}$——单片绝缘子污闪电压，kV，宜根据工程实际情况试验确定；

K_1——灰密修正系数；

K_2——不均匀修正系数。

不同标偏倍数所对应的绝缘子耐受概率见表4-28。

表4-28 不同标偏倍数代表的绝缘子耐受概率

n	2	2.5	3
闪络概率	2.3%	0.62%	0.13%
耐受概率	97.7%	99.38%	99.87%

【例4-1】±500kV直流输电线路，所在地区盐密取值为0.05mg/cm²，灰密取值为0.30mg/cm²，上、下表面积污比（T/B）取值为1:5，采用我国早期统一的污耐压法计算CA-735EZ绝缘子的片数。CA-735EZ绝缘子的污闪电压采用表4-26中NGK在2002年提供的数值。

解 （1）根据所在地区盐密值查表4-26，得出单片绝缘子的污闪电压值

$$U_{50\%}=15(\text{kV})$$

（2）求得污闪电压灰密修正系数

$$K_1=\left(\frac{0.3}{0.1}\right)^{-0.12}=0.8765$$

（3）求得污闪电压绝缘子上下表面污秽不均匀分布修正系数

$$K_2=1-0.38\times\lg\left(\frac{1}{5}\right)=1.266$$

（4）求得污闪电压修正值

$$U'_{50\%}=15\times0.8765\times1.266=16.64(\text{kV})$$

（5）求得CA-735EZ绝缘子的片数

$$N=\frac{1.03\times500}{16.64\times(1-3\times0.07)}=39.18$$

取整后，绝缘子片数为40。

2. 爬电比距法

当直流绝缘子无可靠污闪电压数据时，也可参照污秽等级按爬电比距选择绝缘子片数。按爬电比距选择绝缘子片数是交流线路常用的方法，直流线路按爬电比距选择绝缘子片数还缺乏足够的运行经验，只能根据交流线路的运行经验，再考虑二者积污特性和污闪特性的差别，外推到直流线路的设计中。

（1）爬电比距要求值。

直流线路极电压是同标称电压的交流线路相电压的$\sqrt{3}$倍，因此直流线路的爬电比距至少是交流的$\sqrt{3}$倍。2005年，中国电力科学研究院曾会同有关省电力试验研究所对葛—南直流工程的外绝缘运行状况进行调查，并将葛—南直流工程绝缘子串的放电现象和邻近的同等级交流线路进行了对比，发现当直流绝缘子串的实际爬电比距低于交流绝缘子串的1.7倍时，二者表面放电状态存在较为明显的差别，当比距倍数为1.9～2.0时，二者的表面放电趋于同一。参照电科院对交直流积污的测试结果，当用爬电比距法选择绝缘子片数时，直流线路的爬电比距不宜小于同地区交流线路（额定线电压）的2倍。

表4-29给出了几个典型±500kV直流线路的爬电比距取值情况。

表4-29 几个典型±500kV直流线路的爬电比距取值

盐密（mg/cm²）	爬电比距（cm/kV）					
	葛—南	天—广	龙—政	贵—广	三—广	三—沪
0.03	3.27	3.27	3.58	—	—	—
0.05	3.48	—	3.80	4.14	4.14	4.48
0.06	—	3.48	—	—	—	—
0.07	3.92	—	—	—	—	—
0.08	—	3.82	4.48	4.82	4.82	5.26

葛—南直流工程设计时，还根据对原电力部提出的我国电网110～220kV交流线路防污运行经验数据的分析，得出在导线对地电压情况下，交流爬电比距$\lambda_{交}$与等值盐密的对数拟合关系，如式（4-104）所示。

$$\lambda_{交}=0.8891\times\ln(ESDD)+6.2606 \quad (4\text{-}104)$$

式中 $ESDD$——等值盐密，mg/cm²。

根据交直流爬电比距关系，直流线路爬电比距$\lambda_{直}$可按式（4-105）计算。

$$\lambda_{直}=\frac{2\times\lambda_{交}}{\sqrt{3}} \quad (4\text{-}105)$$

近年来，交直流线路设计均采用统一爬电比距[用相（极）最高电压计算]，设计时应注意数值的等效折算。

（2）绝缘子片数的选择。

采用爬电比距法时，直流线路绝缘子片数按式（4-106）计算。

$$n\geqslant\frac{\lambda U}{L_s} \quad (4\text{-}106)$$

式中 L_s——单片绝缘子的有效爬电距离，$L_s=K_eL_{01}$，cm；
n——绝缘子片数；
λ——爬电比距，cm/kV；
U——系统标称电压，kV；
K_e——单片绝缘子的爬电距离有效系数；
L_{01}——单片绝缘子的几何爬电距离，cm。

【例 4-2】±500kV 直流输电线路，所在地区盐密取值为 0.05mg/cm²，按爬电比距法计算 210kN 钟罩型瓷绝缘子片数。

解 （1）根据所在地区盐密值，计算交流相对地爬电比距。

$$\lambda_{交}=0.8891\times\ln(0.05)+6.2606$$
$$=3.597\ (\text{cm/kV})$$

（2）根据交直流积污特性差别求得直流爬电比距，直交流爬距比取 2。

$$\lambda_{直}=\frac{\lambda_{交}\times 2}{\sqrt{3}}$$
$$=4.154\ (\text{cm/kV})$$

（3）根据爬电比距法求得绝缘子片数。210kN 钟罩型瓷绝缘子爬电距离为 54.5cm，有效爬距系数为 1。

$$n=\frac{\lambda_{直}U}{L_s}$$
$$=\frac{4.154\times 500}{54.5\times 1}$$
$$=38.1$$

取整后，绝缘子片数为 39 片。

（三）工作电压下的复合绝缘子长度

1. 复合绝缘子的直流污闪特性

（1）复合绝缘子污闪电压与长度的关系。

与盘形绝缘子一样，复合绝缘子直流污闪电压与长度呈线性关系。重庆大学在海拔 232m 的条件下进行了不同长度复合绝缘子的直流污闪试验研究，试验结果验证了其线性关系，如图 4-56 所示。

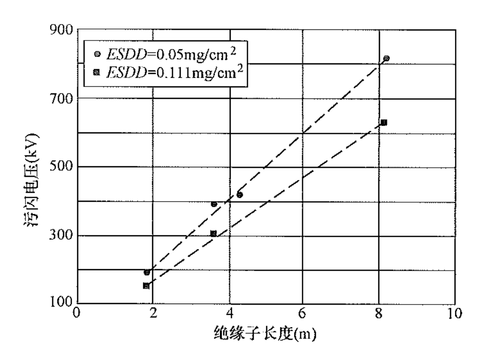


图 4-56 直流线路复合绝缘子污闪电压与长度的关系

中国南方电网公司在瑞典输电研究院（STRI）实验室，对自主研发的±800kV 特高压直流复合绝缘子，完成了全电压、全尺寸污闪特性试验。试验在 $ESDD/NSDD=0.05/0.33\sim0.34\text{mg/cm}^2$ 条件下，得到 8.16m 和 4.23m 两种复合绝缘子的污闪电压分别为 816kV 和 412kV，闪络梯度分别为 106.7kV/m 和 105.6kV/m，两者基本呈线性关系。

（2）复合绝缘子的憎水性和憎水性迁移。

复合绝缘子优异的耐污闪性能来源于硅橡胶材料的憎水性和憎水性迁移。硅橡胶中的聚硅氧烷分子为弱极性，表面还含有大量低表面能的小分子非极性羧基团（如甲基）和游离态的有机硅低聚物。羧基团排列在硅氧主链外侧，使整个聚硅氧烷分子呈非极性和低表面能，水在硅橡胶表面就会形成相互分离的水珠或水滴状态，难以构成导电通路，复合绝缘子从而具有很好的憎水性；游离态的低聚物具有向表面扩散的特性，使吸附在复合绝缘子表面的污秽层也具有憎水性。

复合绝缘子的憎水性迁移速度跟污秽灰成分、湿度和温度有关。污秽灰成分对憎水性迁移影响很大，硅藻土含量越高，憎水性迁移越快；湿度对憎水性迁移也有一定影响，湿度越大，憎水性迁移越慢；温度对憎水性迁移影响很大，温度升高加快了小分子聚合物的迁移，憎水性迁移变快。复合绝缘子的污闪电压随憎水性迁移时间逐渐增大，并最终饱和。

我国直流线路一般按照弱憎水性的污闪特性确定复合绝缘子的长度，弱憎水性是污秽层从完全亲水状态向憎水状态转变时的过渡环节。中国电力科学研究院在国家电网公司特高压直流试验基地的污秽及环境试验室，进行了复合绝缘子的污闪试验，在采用 V 形串布置时，复合绝缘子在弱憎水性条件下的污闪电压比亲水性条件下提高了 11.11%。

（3）污闪电压与盐密的关系。

与盘形绝缘子一样，直流线路复合绝缘子污闪电压梯度随着盐密的增加而降低，符合负幂指数关系，可按式（4-107）计算。

$$U_{50\%}=A\times(ESDD)^{-\alpha} \tag{4-107}$$

式中 A——由绝缘子材质和结构决定的常数；
α——污秽对污闪电压 $U_{50\%}$影响的特征指数。

中国电力科学研究院对一大两小、一大一小两种伞形的复合绝缘子进行了±800kV 直流污闪特性试验，绝缘子几何参数如表 4-30 所示，试验结果如图 4-57 所示。

表 4-30 复合绝缘子试品的几何参数

伞型	试品	盘径（mm）	爬电距离（mm）	伞间距（mm）	绝缘高度（mm）	每米绝缘高度的爬电距离（mm）
一大两小	BBS 1	218/147/147	12120	110/33/38	2950	4108
	BBS 2	189/110/110	13877	90/31/29	3925	3536
	BBS 3	175/125/125	6339	120/42/38	2020	3138
一大一小	BS 4	175/125	6235	90/47	2020	3087

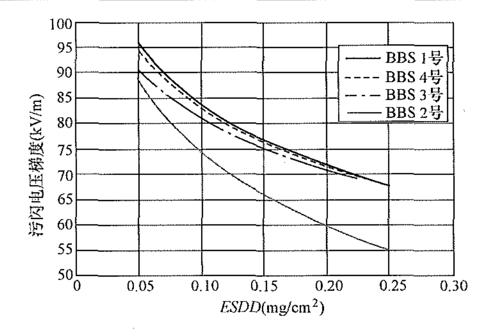


图 4-57 复合绝缘子污闪电压与表面盐密之间的关系曲线

中国南方电网技术研究中心根据在瑞典 STRI 实验室完成的±800kV 直流复合绝缘子全电压全尺寸污秽特性试验情况，提出了复合绝缘子污闪电压梯度与盐密的计算公式。

$$U_{50\%}=40.03\times(ESDD)^{-0.34} \tag{4-108}$$

清华大学和中国南方电网技术研究中心在海拔 1970m 的云南电力试验研究院超高压试验基地，采用一大一小外形结构的复合绝缘子（结构高度 2250mm、大伞直径 218mm、小伞直径 146mm），在灰密为 1mg/cm² 的条件下，得到了复合绝缘子污闪电压梯度与盐密的计算公式。

$$U_{50\%}=30.7\times(ESDD)^{-0.2855} \tag{4-109}$$

清华大学在高海拔环境下，选用了一大一中四小、一大两小两种伞型复合绝缘子和 XZP-300 瓷绝缘子进行了直流污闪特性试验，图 4-58 为试验结果。由

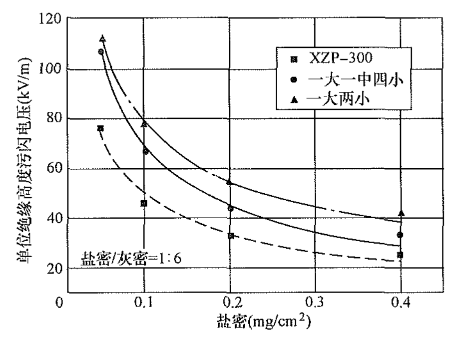


图 4-58 复合绝缘子与瓷绝缘子的污闪特性比较

试验结果可知，复合绝缘子污闪电压梯度比瓷绝缘子高 15%～25%，污闪电压受污秽程度的影响相对较小，在污秽严重地区使用具有优势。

（4）污闪电压与灰密的关系。

复合绝缘子污闪电压与灰密之间的关系曲线如图 4-59 所示，盐密取值 0.1mg/cm²。

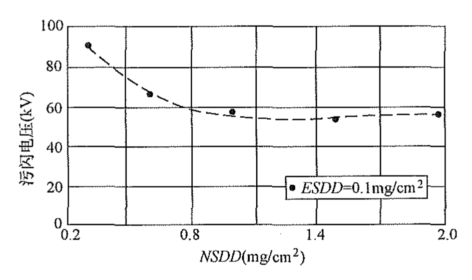


图 4-59 复合绝缘子污闪电压与灰密之间的关系曲线

当灰密在 0.3～1.0mg/cm² 变化，复合绝缘子污闪电压随着灰密的增加而下降，灰密修正系数可按式（4-110）计算。

$$K_1=0.99NSDD^{0.3225} \tag{4-110}$$

当灰密＞1.0mg/cm² 时，复合绝缘子污闪电压随着灰密的增加出现变化趋缓现象，甚至略有升高，可不考虑进行灰密修正。

（5）污闪电压与污秽不均匀分布的关系。

复合绝缘子伞的下表面无棱，上下表面爬电距离相差不大，直流污闪梯度随污秽不均匀度的变化幅度较盘形瓷或玻璃绝缘子要小，复合绝缘子上下表面污秽比分别为 1:1 和 1:7 时，污闪电压相差大约 6.5%。

复合绝缘子污闪电压污秽不均匀分布修正系数可按式（4-111）计算。

$$K_2=1-A\lg(T/B) \tag{4-111}$$

式中 K_2——污秽不均匀分布修正系数；

T——绝缘子上表面盐密；

B——绝缘子下表面盐密；

A——常数，跟绝缘子型式有关。

复合绝缘子的常数 A 取值较盘形瓷或玻璃绝缘子要小，清华大学相关试验推荐 A 取值为 0.2。

（6）污闪电压与伞形的关系。

复合绝缘子污闪电压不仅与污秽度相关，还与其本身的结构参数密切相关。通过改变复合绝缘子伞裙直径、数量和间距等结构参数，可以在给定的结构高度下生产出不同爬电距离的复合绝缘子；但过度追求大爬距，绝缘子的耐污性能不会获得明显的改善，反而还可能出现下降。

清华大学和中国南方电网技术研究中心在盐密和灰密分别为 0.1 和 0.6mg/cm² 条件下，对一大一小、一大两小、一大一大一中四小、一中两小等 4 种不同

伞形复合绝缘子污闪特性的试验结果进行了研究对比，试验样品的参数如表4-31所示，试验结果如图4-60所示。由试验结果可知：①一大一小和一大两小伞形的复合绝缘子的直流污闪特性最优，一大一中四小伞形的复合绝缘子污闪特性次之，而一大一中两小伞形的复合绝缘子的污闪特性较差；②爬电系数增大到一定程度后，复合绝缘子污闪电压没有明显提高。

我国直流线路复合绝缘子爬电系数取值一般为3.8，CIGRE 518 建议复合绝缘子爬电系数不大于4。

表 4-31　复合绝缘子试品的结构参数

编号	伞裙结构	伞伸出（mm）			伞间距（mm）	爬电距离（mm）	爬电系数 CF
10	一大一小	90	66	—	90	7550	3.97
11		90	66	—	100	7000	3.68
25	一大两小	90	54	—	110	7700	4.05
32		90	54	—	120	7453	3.92
33	一大一中四小	82.5	56.5	34	158	7560	3.9
34		90.9	70.9	45.9	193	7700	4.05
35	一大一中两小	97	77	57	268	5527	2.91
36		79.5	64.5	49.5	182	6956	3.66

注　爬电系数，绝缘子总的爬电距离与绝缘高度的比值。

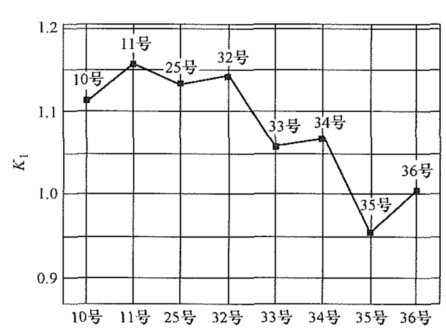


图 4-60　不同伞裙结构复合绝缘子污闪电压比较结果

2. 污耐压法

与盘形绝缘子片数选择一样，复合绝缘子长度选择污耐压法可按式（4-112）计算：

$$L=\frac{KU_{\text{N}}}{U'_{50\%}(1-n\sigma)} \tag{4-112}$$

式中　L——复合绝缘子长度，m；

U_{N}——系统额定电压，kV；

K——最高工作电压倍数；

$U'_{50\%}$——复合绝缘子单位长度污闪电压修正值，kV；

σ——绝缘子污闪电压的标准偏差，一般取 7%；

n——标偏倍数。

复合绝缘子单位长度污闪电压修正值 $U'_{50\%}$ 可按式（4-113）计算。

$$U'_{50\%}=U_{50\%}K_1K_2 \tag{4-113}$$

式中　$U_{50\%}$——复合绝缘子单位长度污闪电压，kV/m，一般根据工程实际情况试验确定；

K_1——灰密修正系数；

K_2——绝缘子上下表面污秽不均匀分布修正系数。

3. 爬电比距法

与盘形绝缘子片数选择爬电比距法不同，用爬电比距法选择复合绝缘子长度时，可首先计算出相同污秽条件下的盘形绝缘子爬电距离，然后根据复合绝缘子和盘形绝缘子两者之间的污闪特性差别对爬电距离进行修正，最后结合复合绝缘子爬电系数（爬电距离/干弧距离）推算其长度。

根据 DL 5497—2015 和 GB 50790—2013 的规定：复合绝缘子在轻、中、重污区的爬电比距不宜小于盘形悬式绝缘子最小要求值的3/4，重污区可根据污耐压试验结果适当减小爬电距离。

复合绝缘子爬电系数则跟复合绝缘子伞裙大小、裙间距等有关，我国直流线路复合绝缘子爬电系数取值一般为3.8，CIGRE 518 建议复合绝缘子爬电系数不大于4。

复合绝缘子长度还应满足雷电过电压和操作过电压的要求。

【例 4-3】 ±500kV 直流输电线路，所在地区盐密取值为 0.08mg/cm²，暂不考虑灰密修正，上、下表面积污比（*T/B*）为 1:8，复合绝缘子污闪电压值采用图 4-57 所示的 BBS1 绝缘子试验数据，按污耐压法计算复合绝缘子长度。

解　（1）根据盐密取值查得复合绝缘子单位长度污闪电压。

$$U_{50\%}=87.4\ (\text{kV/m})$$

（2）灰密不考虑修正，系数 K_1 取 1。

（3）根据上、下表面积污比，求得污秽不均匀修正系数 K_2。

$$\begin{aligned}K_2&=1-A\lg(T/B)\\&=1-0.2\times\lg(1/8)\\&=1.18\end{aligned}$$

（4）根据修正系数，求得复合绝缘子单位长度污闪电压修正值 $U'_{50\%}$。

$$\begin{aligned}U'_{50\%}&=U_{50\%}K_1K_2\\&=87.4\times1\times1.18\\&=103.13\ (\text{kV/m})\end{aligned}$$

（5）绝缘子污闪电压的标准偏差系数取 7%，标偏

倍数取 3，求得复合绝缘子长度。

$$L = 1.03 \times U_N / U'_{50\%} / (1 - n\sigma)$$
$$= 1.03 \times 500 / 103.13 / (1 - 3 \times 0.07)$$
$$= 6.32\ (m)$$

4. 海拔及串型修正

（1）海拔修正。

1）DL 5497—2015 和 GB 50790—2013 规定：高海拔地区，随着海拔升高或气压降低，污秽绝缘子的闪络电压随之降低。在海拔超过 1000m 的地区，绝缘子的片数应进行修正，修正方法可按照式（4-114）确定。

$$n_H = ne^{0.1215 m_1 (H-1000)/1000} \qquad (4\text{-}114)$$

式中 n ——海拔 1000m 每联绝缘子所需片数；

n_H ——高海拔地区每联绝缘子所需片数；

H ——海拔，m；

m_1 ——特征指数，反映气压对于污闪电压的影响程度，由试验确定。

特征指数 m_1 如无试验数据，可参考交流绝缘子试验值，一般可取 0.4～0.6。表 4-32 给出了部分形状绝缘子 m_1 参考值。

表 4-32　部分形状绝缘子 m_1 参考值

绝缘子形状	m_1
普通形	0.5
双伞防污形	0.38
三伞防污形	0.31

2）根据试验情况，国内外研究机构还提出了直流线路绝缘子污闪电压与气压之间的关系式，如式（4-115）所示。

$$\frac{U}{U_0} = \left(\frac{P}{P_0}\right)^n \qquad (4\text{-}115)$$

式中 U_0 ——常压 P_0 下的污闪电压，kV；

U ——气压 P 下的污闪电压，kV；

n ——下降指数。

下降指数 n 反映气压对于污闪电压的影响程度，因绝缘子结构形状、表面盐密及其他条件的不同，n 值有差异，表 4-33 给出了国内外研究机构推荐的 n 值。

表 4-33　国内外研究机构推荐的 n 值

研究机构	n 值
日本	0.40（+），0.35（−）
苏联	0.38～0.55（−）
瑞典	0.50（−）
加拿大	0.40（+），0.35（−）
中国（清华大学）	0.25（+），0.31（−）
中国（重庆大学）	0.35～0.56

绝缘子直流污闪电压随气压下降的指数分散性较大，但都小于相同条件下交流污闪电压的指数，气压对直流污闪电压的影响比交流要小。

复合绝缘子直流污闪电压随气压下降的规律和盘形绝缘子是一致的，但下降指数要大于盘形绝缘子，一般为 0.6～0.8。

3）在实际线路工程的外绝缘设计中，非线性公式应用起来很不方便。中国电力科学研究院在高海拔地区进行了相关试验研究，对盘形绝缘子片数的海拔修正提出线性公式，如式（4-116）所示。

$$n_H = \frac{n_0}{1 - k_1(H/1000)} \qquad (4\text{-}116)$$

式中 k_1 ——海拔修正系数，由试验确定，表 4-34 给出了部分绝缘子的参考值；

n_0 ——0m 海拔的绝缘子片数；

n_H ——海拔 H_m 的绝缘子片数；

H——海拔，m。

表 4-34　k_1 的参考值

序号	伞型	型号	k_1
1	钟罩型绝缘子	CA-756EZ	0.021
2	双伞型绝缘子	XZWP-300	0.039
3	三伞型绝缘子	CA-776EZ	0.039

清华大学的相关研究进一步表明，绝缘子上、下表面污秽分布情况对绝缘子直流电弧发展路径影响较大，影响着污闪电压随海拔升高而下降的速率，通过比较不同海拔下 210kN、300kN 钟罩型绝缘子人工污秽试验结果，得出了绝缘子表面污秽分布均匀与不均匀两种条件下直流污闪线性海拔修正系数分别为 6% 和 3%。

（2）绝缘子串型式。

1）并联绝缘子串。

并联绝缘子串的联间距和串长对污闪电压有影响。中国电力科学研究院在盐密和灰密分别为 $0.1mg/cm^2$ 和 $1.0mg/cm^2$ 的条件下，进行了并联绝缘子串污闪特性试验，对于 60 片串，当并联串间距为 600mm 时，其污闪电压与单联串基本相当，而当串间距减小为 500mm 时，污闪电压下降了 6%，并联串的污闪电压随串间距减小而下降。与 60 片串相比，23 片串在 500mm 串间距下，其污闪电压仅下降了 2%，并联串的污闪电压随串长增加而下降。

特高压直流线路大多采用双串或多串并联形式，并联串的联间距对污闪电压有一定影响。目前工程设计中，特高压直流线路并联串的联间距取值在 600mm 及以上时，可不考虑其对污闪电压的影响。

2）V 形绝缘子串。

我国直流线路直线塔一般采用 V 形悬垂绝缘子串。尽管与 I 形绝缘子串的人工污秽试验结果相比，V 形串没有明显差别，但由于 V 形串结构有利于减少绝缘子表面积污，污秽仅为单 I 串的 85%甚至更低，相应增大了绝缘子串污闪电压，有利于减少直流线路绝缘子片数、缩短串长。

（四）过电压条件下的绝缘子片数

1. 操作过电压

（1）操作过电压产生情况。

直流线路上产生操作过电压的情况主要有以下两种：

1）在双极运行时，一极对地短路，将在健全极产生操作过电压。这种操作过电压不仅影响直流线路绝缘配合，还影响两侧换流站直流开关场过电压保护和绝缘配合。过电压的幅值除了与线路参数相关外，还受两侧电路阻抗的影响。

2）对开路的线路不受控充电，也称空载加压。当直流线路对端开路，而本侧以最小触发角解锁时，将在开路端产生很高的过电压。这种过电压不但能加在直流线路上，而且也可能直接施加在对侧直流开关场和未导通的换流器上。这种过电压可通过在站控中协调两侧的网络状态和解锁顺序，或者在极控中加连锁的技术，将发生概率降低到工程设计可不予考虑的程度。

（2）操作过电压倍数。

美国太平洋联络线实测健全极上的过电压为 1.7p.u.左右，苏联±400kV 和±500kV 直流线路操作过电压为 1.7p.u.，巴西的伊泰普±660kV 直流架空线路操作过电压按 1.7p.u.设计，美国能源部颁布的直流超高压输电线路电气和机械设计标准，操作过电压设计值取 1.65p.u.。直流线路操作过电压水平与线路终端参数和接地故障位置有关，采取一定措施后过电压倍数可显著降低，目前我国±500kV 直流线路的过电压水平一般在 1.5～1.8p.u.，±660kV 直流线路操作过电压水平计算结果在 1.7p.u.，±800kV 直流线路操作过电压水平计算结果在 1.6～1.8p.u.，±1100kV 直流线路操作过电压水平计算结果在 1.5～1.58p.u.。

（3）操作过电压配合方法，如式（4-117）所示。

$$U_{50\%} \geqslant KK_0U_m \tag{4-117}$$

式中 $U_{50\%}$——绝缘子串的正极性 50% 操作冲击放电电压，kV；

K——操作过电压倍数；

K_0——线路绝缘子串操作过电压配合系数，1.25；

U_m——最高运行电压。

（4）操作过电压下的绝缘子片数。

直流线路绝缘子的积污较交流严重得多，污秽条件要求的绝缘子片数较多。根据美国 EPRI 试验验证，在同一污秽条件下，同型号的绝缘子直流操作耐压为直流耐压的 2.2～2.3 倍，又根据大量试验研究，当预加直流电压时，绝缘子 50%操作冲击电压是 50%污闪运行电压的 1.7～2.3 倍。因此，直流线路绝缘子片数由污秽条件下的额定工作电压决定，操作过电压一般不成为选择绝缘子片数的决定条件。

例如±500kV 直流线路最高运行电压为 515kV，过电压水平取 1.8p.u.，根据式（4-117）所示的绝缘子串正极性 50%操作冲击放电电压计算公式，求得操作过电压要求的绝缘子串正极性 50%操作冲击放电电压为 1159kV。考虑相对空气密度系数为 0.85，污秽影响系数为 1.1，可求得在相对空气密度系数为 1 时的绝缘子串临界操作电压为 1500kV，其对应绝缘子（170mm 结构高度）需要 25～27 片。而由于按污秽条件下绝缘子闪络性能选定的±500kV 直流线路绝缘子片数基本上在 35 片以上。

2. 雷电过电压

直流线路雷电过电压的产生机理和交流线路相同，绝缘子串的雷电冲击闪络电压和绝缘子型式的关系很小，主要取决于绝缘子的串长，并和串长呈线性关系。

由于直流输电所具有的某些独特特性，使得线路绝缘子串的雷电过电压要求有所不同。一方面，直流线路发生雷击引起绝缘闪络并建弧后，不存在断路器跳闸问题，通常是整流器转为逆变器运行，使得直流电压和电流降为零，经过一定的去游离时间后，重新再启动，直流系统恢复送电，整个过程不超过 100ms，基本上不影响线路连续运行。另一方面，直流线路绝缘子的积污效应较强，绝缘子片数一般由污秽条件下的工作电压控制，而不是雷电过电压。因此，在实际工程设计中，直流线路绝缘子片数的选择也不取决于雷电过电压。

一般来说，直流线路单极反击闪络率要求不大于 0.6 次/（100km·年）。根据葛—南直流工程的雷电校核计算，若线路采用 28 片绝缘子串，当冲击接地电阻小于 10Ω 时，单极反击闪络次数为 0.11 次/（100km·年），双极反击闪络次数为 0.005 次/（100km·年），即 1000km 的双极闪络次数为 20 年 1 次。当冲击接地电阻为 20Ω 时，单极反击闪络次数为 0.59 次/（100km·年），双极反击闪络次数为 0.027 次/（100km·年）。而±500kV 直流线路按污秽条件选择的绝缘子片数基本上在 35 片以上，一般也能满足防雷要求。

3. 有关规程规定

GB 50790—2013、DL 5497—2015 对直流输电线路绝缘配合设计的要求有如下规定：

（1）在海拔 1000m 以下地区，轻污区工作电压要求的悬垂绝缘子串绝缘子片数（钟罩型）不宜小于表 4-35 的数值。

表 4-35　轻污区工作电压要求的悬垂绝缘子串绝缘子片数（钟罩型）

标称电压（kV）	±500kV		±660kV		±800kV	±1100kV
串型	"I" 型	"V" 型	"I" 型	"V" 型	"V" 型	"V" 型
单片绝缘子的高度（mm）	170	170	170（195）	170（195）	170（195）	240
爬距（mm）	545	545	545（635）	545（635）	545（635）	635
绝缘子片数（片）	40	38	53（46）	51（44）	60（56）	83

注　±1100kV 为准东—华东工程数据。

（2）在重冰区海拔 1000m 以下清洁地区，采用 160kN 和 210kN 钟罩型直流绝缘子"I"型时，±500kV 线路绝缘子片数不宜小于 42 片，±660kV 线路绝缘子片数不宜小于 55 片。

（3）耐张绝缘子串的绝缘子片数可取悬垂串同样的数值。在中、重污区，爬电距离可根据运行经验较悬垂绝缘子串适当减少。

四、直流线路空气间隙计算

直流输电线路空气间隙应能耐受直流工作电压、操作过电压和系统外部的雷电过电压，并考虑海拔、雨、雾等环境因素对空气间隙产生的影响。

（一）工作电压间隙

1. 棒—棒和棒—板间隙的直流放电特性

输电线路塔头空气间隙在直流电压下的放电特性研究，通常是与棒—板、棒—棒两种电极形状间隙的放电特性联系在一起的。棒—板间隙代表了类似尖端对平板结构的电极形状，棒—棒间隙代表了类似尖端对尖端结构的电极形状。借助棒—板和棒—棒电极放电特性的研究特性，可对类似或接近形状结构的电极放电特性进行估算。

国内外研究机构对棒—板和棒—棒间隙在直流电压下的放电特性进行过研究，图 4-61 和图 4-62 给出了中国电力科学研究院在北京、西藏以及国外相关机构对棒—板和棒—棒间隙直流放电特性曲线。

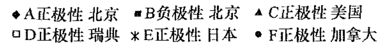
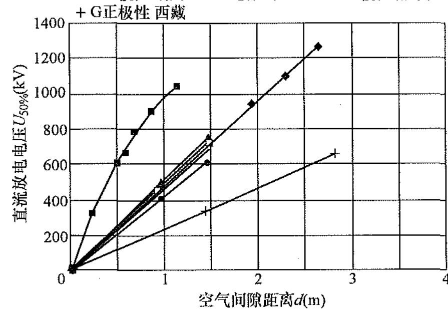



图 4-61　棒—板间隙的直流放电特性

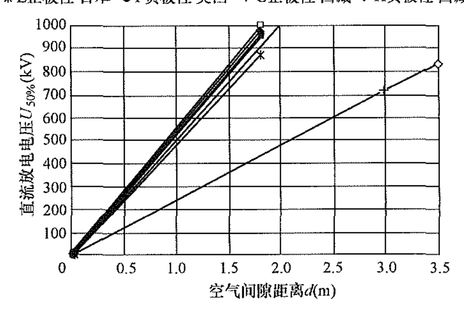


图 4-62　棒—棒间隙的直流放电特性

从图 4-61 中棒—板间隙的放电特性曲线可以看出，棒—板间隙的放电特性具有明显的极性效应，负极性放电电压远高于正极性放电电压，且分散性较大，负极性电压（北京）的放电梯度约为–978kV/m。正极性放电电压与间隙距离呈线性关系，放电梯度在北京和西藏分别约为 478kV/m 和 235kV/m。

从图 4-62 中棒—棒间隙的放电特性曲线可以看出，正极性棒—棒间隙的直流放电电压与负极性非常接近，都与间隙距离呈线性关系。棒—棒间隙的放电电压比正极性棒—板间隙的放电电压稍高，北京和西藏棒—棒间隙的平均放电电压梯度分别约为 500kV/m 和 239kV/m。

2. 直流杆塔空气间隙的直流放电特性

国外对于输电线路塔头空气间隙在直流电压下的放电特性研究很少。中国电力科学研究院曾对±500kV 和±800kV 直线塔悬垂绝缘子串 I 形串布置进行了导线与杆塔空气间隙研究，图 4-63 为正极性直流电压的试验结果，图 4-64 为负极性直流电压的试验结果。

在正极性直流电压作用下，正极性导线对塔身间隙的放电电压与间隙距离呈线性关系，平均放电梯度为 460kV/m，更接近于棒—板间隙的放电电压。

在负极性直流电压作用下，负极性导线对塔身间隙的放电电压明显高于正极性导线，与棒—棒间隙的放电电压相近，远低于棒—板间隙的放电电压。

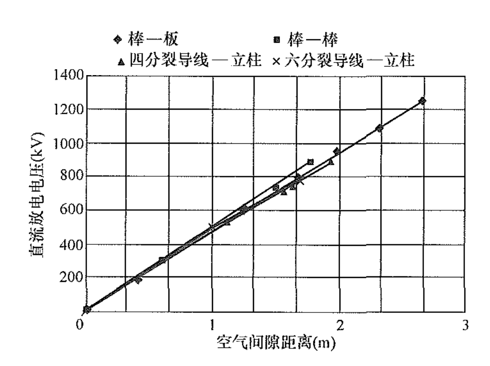


图 4-63　分裂导线对杆塔空气间隙的正极性直流放电特性

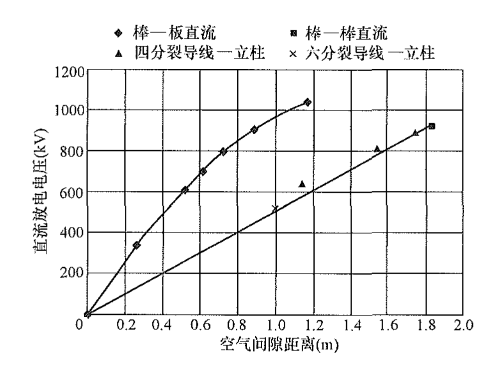


图 4-64　分裂导线对杆塔空气间隙的负极性直流放电特性

由于正极性导线对塔身间隙的放电电压低于负极性导线对塔身的放电电压，因此在计算直流工作电压下杆塔空气间隙距离时，按正极性导线对塔身间隙的放电电压考虑。

3. 直流杆塔工作电压空气间隙计算

直流线路绝缘子串风偏后导线对杆塔空气间隙的50%放电电压 $U_{50\%}$应符合式（4-118）要求。

$$U_{50\%}=\frac{K_2K_3U_e}{(1-3\sigma_N)K_1} \tag{4-118}$$

式中　U_e——额定工作电压，kV；

σ_N——空气间隙直流放电电压的变异系数，可取 0.9%；

K_1——直流电压下空气密度校正系数，标准气象条件下取 1；

K_2——直流电压下空气湿度校正系数，标准气象条件下取 1；

K_3——安全系数，1.15；如绝缘子串为 V 串，K_3 取 1.25。

通过式（4-118）计算出导线对杆塔空气间隙的50%放电电压 $U_{50\%}$后，再根据导线对杆塔空气间隙的正极性直流放电特性，即可取得直流杆塔工作电压空气间隙。

（二）操作过电压间隙

操作过电压是电力系统开关操作或短路故障引起的系统内参数振荡造成的过电压。由于操作过电压的幅值会大大超过工作电压，因此可能对系统的绝缘造成威胁。

操作过电压波形随电力系统中电感和电容的不同而千变万化，为了模拟操作过电压，目前通常采用两类试验电压波形。一类为非周期性指数衰减波，波前时间从数十微秒到数百微秒，半峰值时间达数千微秒，GB 16927.1—2011 规定的操作冲击电压的标准波形为250/2500μs。另一类是衰减振荡波，其振荡频率从数十赫兹到数百赫兹，相当于波前时间为数百微秒到数千微秒。

正极性的操作冲击 50%放电电压明显低于负极性，因此空气间隙外绝缘强度试验通常在正极性下进行。

1. 棒—棒和棒—板间隙的直流正极性操作冲击放电特性

中国电力科学研究院曾用户外场的 6MV 冲击电压发生器对棒—棒和棒—板间隙的直流正极性操作冲击放电特性进行了试验研究，图 4-65 为棒—板和棒—棒间隙试验特性曲线，图 4-66 为 3m 棒—棒间隙试验特性曲线。

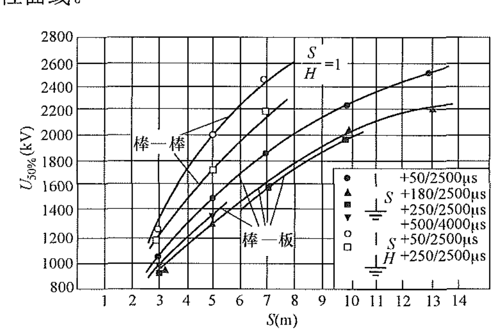


图 4-65　典型电极的正极性操作冲击放电特性

H—棒高；*S*—间隙距离

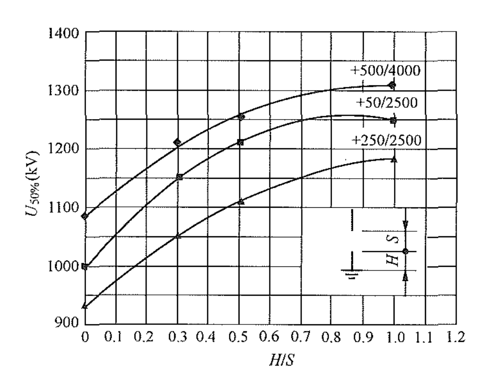


图 4-66　棒—棒间隙操作冲击放电特性

H—棒高；*S*—间隙距离，取 3m

在正极性操作冲击作用下，棒—板和棒—棒间隙的放电特性都呈现出饱和现象，棒—棒间隙的放电电压高于棒—板间隙。

2. 直流线路杆塔空气间隙的操作冲击放电特性

直流输电线路导线排列方式、绝缘子串悬挂方式、导线分裂形式的变化，使得导线和铁塔之间构成空气间隙的电极形状各不相同，在操作冲击电压作用下的直流线路杆塔空气间隙放电特性存在很大差别，需通过实际尺寸的试品放电试验来得出。

中国电力科学研究院在20世纪80年代初对±500kV直流线路导线与杆塔空气间隙放电特性进行研究，图4-67为操作冲击放电曲线。试验时，模拟导线采用4根22mm的铁管组成，间距为450mm，长22m。模拟导线两端安装了直径0.6m的均压环。塔身立柱宽1.1m，长17m。

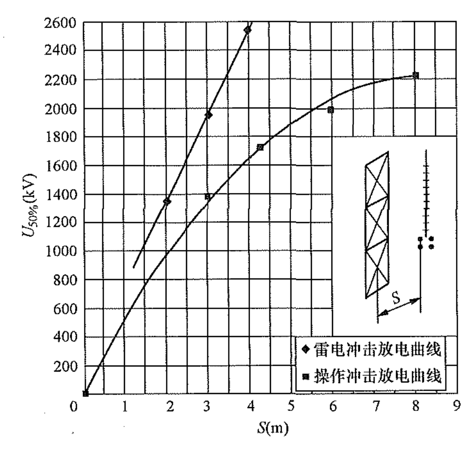


图4-67 导线—塔身空气间隙冲击放电特性

中国电力科学研究院对±500kV拉线塔导线对塔身及拉线的冲击放电电压进行了模拟试验，结果如图4-68所示。

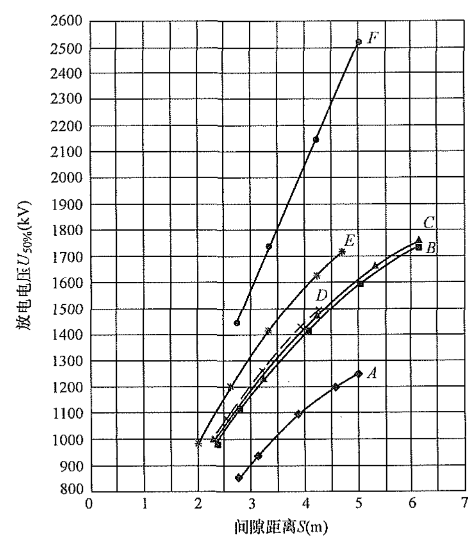


图4-68 四分裂导线—塔空气间隙冲击放电特性

A—棒—板间隙+250/2500μs；B—导线—塔间隙（拉线上移）+250/2500μs；C—导线—塔间隙（原拉线）+250/2500μs；D—导线—塔柱；E—棒—棒间隙+250/2500μs；F—导线—塔间隙（原拉线）+1.5/40μs

中国电力科学研究院对±800kV杆塔空气间隙的冲击放电特性进行了试验研究，并与±500kV直流线路间隙、棒—棒间隙和棒—板间隙放电电压进行了对比，结果如图4-69所示。绝缘子串采用V形串布置，夹角为90°，两端安装均压环；模拟导线长25m，六分裂结构，子导线间距为450mm。

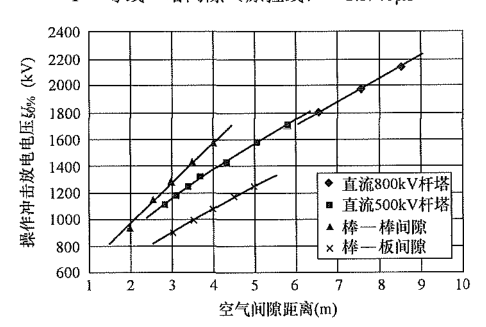


图4-69 直流线路塔头空气间隙操作冲击放电特性比较

中国电力科学研究院在北京（海拔55m）、宝鸡（海拔900m）和青海（海拔2200m）进行了大量±800kV直流线路V形串塔头空气间隙的操作冲击放电特性试验，图4-70为采用插值法得到的0m、500m、1000m、1500m和2000m海拔的操作冲击放电特性曲线。

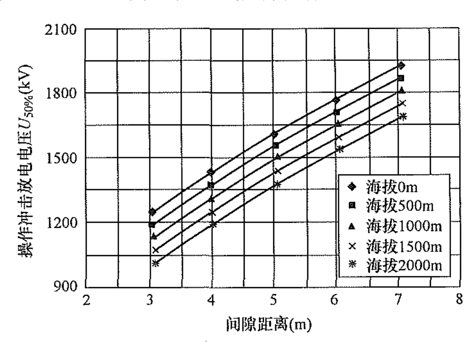


图4-70 ±800kV不同海拔空气间隙操作冲击放电特性

中国电力科学研究院针对±1000kV及以上直流线路直线塔V形串布置时的导线—塔身的空气间隙进行试验，图4-71是在北京获得的低海拔地区塔头空气间隙操作冲击放电特性曲线，图4-72是在西藏获得的4300m高海拔地区塔头空气间隙操作冲击放电特性曲线。

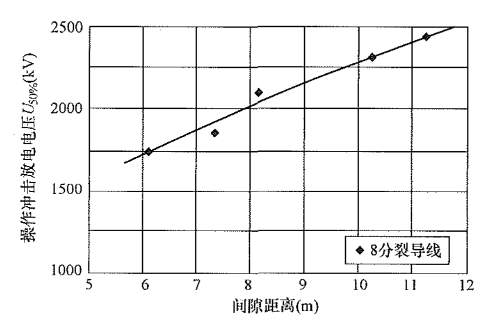


图 4-71　±1000kV 及以上直流线路塔头空气间隙操作冲击放电特性（北京）

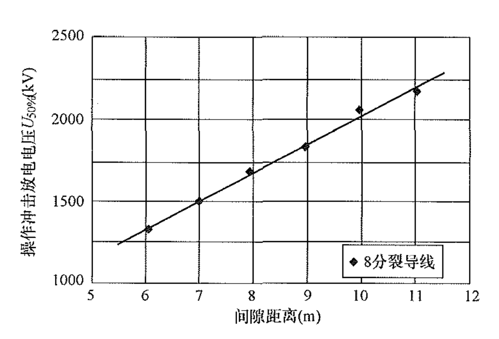


图 4-72　±1000kV 及以上直流线路塔头空气间隙操作冲击放电特性（西藏）

采用插值法对在北京和西藏获得的±1000kV 及以上线路 8 分裂导线塔头间隙操作冲击放电电压值进行拟合计算，可得到如图 4-73 所示的不同海拔下，±1000kV 及以上直流线路 8 分裂导线塔头间隙操作冲击放电特性。

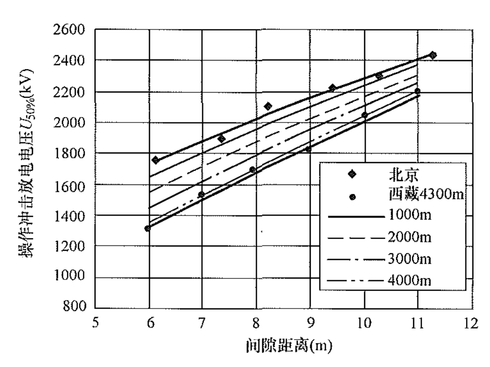


图 4-73　±1000kV 及以上 8 分裂导线塔头间隙操作冲击放电特性

3. 直流杆塔操作过电压空气间隙计算

绝缘子串风偏后导线对杆塔空气间隙正极性 50% 操作冲击放电电压可按式（4-119）进行计算。

$$U_{50\%}=\frac{U_{\mathrm{m}}k_2k_3}{(1-2\sigma_{\mathrm{S}})k_1} \tag{4-119}$$

式中　U_{m}——最高工作电压，kV；

k_1、k_2——操作冲击电压下间隙放电电压的空气密度、湿度校正系数；

k_3——操作过电压倍数；

σ_{S}——空气间隙在操作过电压下放电电压的变异系数，取 5%。

通过式（4-119）计算出导线对杆塔空气间隙正极性 50%操作冲击放电电压后，再根据导线对杆塔空气间隙的正极性操作冲击放电特性，即可取得直流杆塔操作过电压间隙。

（三）雷电过电压间隙

1. 棒—棒和棒—板间隙的雷击冲击放电特性

中国电力科学研究院用户外场的 6MV 冲击电压发生器对棒—板和棒—棒间隙的雷电冲击特性进行了试验研究，特性曲线如图 4-74 所示。

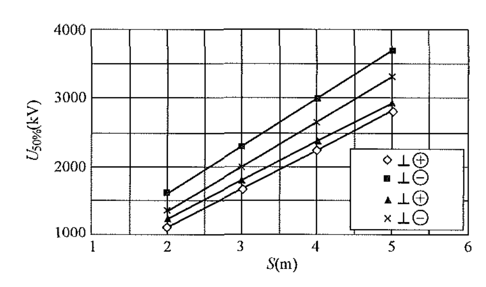


图 4-74　典型电极的雷电冲击放电特性

在雷电冲击作用下，棒—板和棒—棒间隙的放电电压都呈线性关系，负极性棒—板间隙的放电电压最高，其次是负极性棒—棒间隙和正极性棒—棒间隙，正极性棒—板间隙的放电电压最低。

2. 直流线路杆塔空气间隙的雷电冲击放电特性

中国电力科学研究院曾对±500kV 直流线路导线与杆塔空气间隙的雷电冲击放电特性进行了研究，近年来对±800kV 直流线路导线与杆塔空气间隙的雷电冲击放电特性也进行了研究，并与±500kV 直流线路塔头间隙雷电冲击放电特性进行了对比，结果如图 4-75 所示。

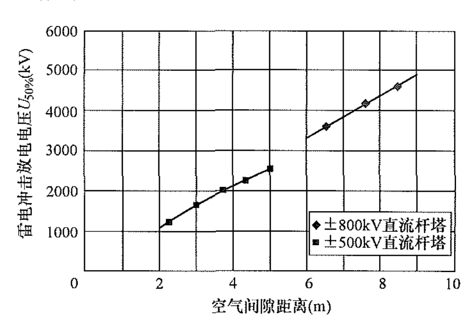


图 4-75　直流线路塔头空气间隙雷电冲击放电特性

±800kV 塔头间隙雷电冲击放电电压与空气间隙距离保持着较好的线性关系，并与±500kV 的特性曲

线有较好的延续性。

3. 直流杆塔雷电过电压空气间隙计算

在雷电过电压情况下，空气间隙的正极性雷电冲击放电电压应与绝缘子串的50%雷电冲击放电电压相匹配，不必按绝缘子串的50%雷电冲击放电电压的100%确定间隙，只需按绝缘子串的50%雷电冲击放电电压的80%确定间隙（间隙按0级污秽要求的绝缘长度配合），即按式（4-120）进行配合计算。

$$U'_{50\%}=80\%\times U_{50\%} \tag{4-120}$$

式中 $U_{50\%}$——绝缘子串的50%雷电冲击放电电压，kV，数值可根据绝缘子串的雷电冲击试验获得或由绝缘长度求得。

对于高压直流线路而言，一般不考虑雷电过电压情况。一般认为，当雷击造成带电部分对塔身放电时，在很短时间（100ms）内，直流系统两端控制系统能很快动作，使故障极闭锁。另外，故障极在很短的时间内就能升压启动，如空气自绝缘恢复则就能很快恢复供电。直流两极电压相差较大，相当于两极不平衡绝缘，雷击不会造成两极同时故障，即使一极雷击故障，另一极仍可输送一半的额定功率。因此，直流系统遭雷击对系统的影响与交流相比要小得多。所以自葛—南直流工程以来，直流线路在进行塔头设计时，雷电过电压下的空气间隙不作为塔头控制条件。

（四）空气间隙修正

1. 海拔修正

海拔对空气间隙放电电压的影响实际上就是气压、温度和湿度等大气参数对放电电压的影响。目前，在国内外现行标准中海拔校正主要有以下三种方法。

（1）IEC 60071—2：1996 中的海拔校正方法。

IEC 60071—2：1996《绝缘配合 第二部分：应用导则》中给出了外绝缘污闪电压从标准气象条件校正至海拔2000m时的校正因数 K_h 的计算公式。

$$K_h=e^{m\left(\frac{H}{8150}\right)} \tag{4-121}$$

式中 H——海拔，m；

m——与电压类型和间隙结构有关的校正因子，对于工频及雷电冲击电压 m=1.0，对于操作冲击电压 m 可由图4-76中所示的曲线查到。

GB 50790—2013《±800kV 直流架空输电线路设计规范》、DL 5497—2015《高压直流架空输电线路设计技术规程》、GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》也均沿用了该海拔修正公式。

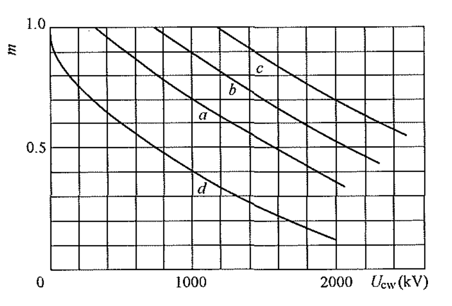


图4-76 指数 m 与操作冲击电压的关系曲线

a—相地绝缘间隙；b—纵绝缘间隙；

c—相相绝缘间隙；d—棒板绝缘间隙

当海拔超过2000m时，宜通过试验研究确定，也可按照公式进行修正。

（2）GB 311.1—2012 中的海拔校正方法。

GB 311.1—2012《绝缘配合 第1部分：定义、原则和规则》规定，空气间隙的闪络电压取决于空气中的绝对湿度和空气密度。绝缘强度随温度和绝对湿度增加而增加；随空气密度减小而降低。湿度和周围温度的变化对外绝缘强度的影响通常会相互抵消。因此，作为绝缘配合的目的，在确定设备外绝缘的要求污闪电压时，仅考虑了空气密度的影响。即

$$K_t=\left(\frac{p}{p_0}\right)^m \tag{4-122}$$

式中 p——设备安装地点的大气压力，kPa；

p_0——标准参考大气压力，101.3kPa；

m——空气密度修正指数（具体取值见 GB/T 16927.1）。

（3）GB/T 16927.1—2011 中的海拔校正方法。

GB/T 16927.1—2011《高电压试验技术 第1部分：一般定义及试验要求》给出了修正因素 K_t，可以将在试验条件下（温度 t、压力 p、湿度 h）测得的破坏性放电电压 U 换算到标准参考大气条件下（温度 t_0、压力 p_0、湿度 h_0）的电压值 U_0。

$$U_0=U/K_t \tag{4-123}$$

K_t 是下列两个因素的乘积，即

$$K_t=K_1K_2 \tag{4-124}$$

式中 K_1——空气密度修正因素，取决于相对空气密度 δ，$K_1=\delta^m$；

K_2——湿度修正因素，可表示为 $K_2=K^W$；

K——取决于试验电压类型并由绝对湿度 h 与相对空气密度 δ 的比率的函数来求得；

m、W——校正指数，依赖于预放电模型，其具体取值参见 GB/T 16927.1。

当温度以摄氏度表示时，相对空气密度 δ 为

$$\delta = \frac{p}{p_0} \times \frac{273 + t_0}{273 + t} \quad (4\text{-}125)$$

2. 塔身宽度影响

中国电力科学研究院在±800kV 塔头间隙放电试验时，采用多种横担和塔身宽度进行了试验比较。当单导线到塔身的间隙为 6.5m 时，横担宽度每增加 1m，放电电压降低 3.5%左右。

原武汉高压研究院总结多个实验室的研究结果，认为导线对杆塔的正极性操作冲击电压与对应导线位置的塔身宽度 ω 之间存在以下关系式：

$$U_{50\%}(\omega) = U_{50\%}(1) \times (1.03 - 0.03 \times \omega) \quad (4\text{-}126)$$

式中 $U_{50}(1)$——塔身宽为 1m 时的操作冲击 50%放电电压，kV；

$U_{50\%}(\omega)$——塔身宽为 ω 时的操作冲击 50%放电电压，kV。

式（4-126）适用于 ω 的取值范围为 0.02～5m 时。

3. 直流叠加操作冲击的影响

直流输电线路故障引起的过电压波形是叠加在直流运行电压之上的振荡波形，波形具有较大的随机性。考虑到直流预电压可能对操作冲击放电特性的影响，国内外在典型电极间隙的放电特性研究中也进行了直流叠加冲击的试验。

中国电力科学研究院于 1985 年研究了直流叠加冲击对杆塔空气间隙放电电压的影响，图 4-77 为试验得到的棒—板间隙的直流叠加操作冲击试验结果，直流叠加操作冲击的放电电压高于操作冲击的放电电压 12%～17%。

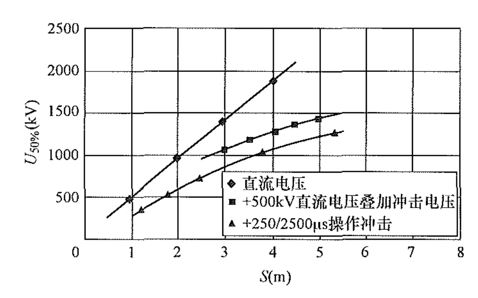


图 4-77 棒—板间隙的正极性直流叠加操作冲击放电特性

图 4-78 为±500kV 直流杆塔导线—塔身间隙的直流叠加操作冲击电压放电试验结果，正极性直流叠加操作冲击的放电电压比正极性操作冲击的放电电压高 3%～5%。

图 4-79 为±800kV 直流杆塔导线—塔身间隙的直流叠加操作冲击电压放电试验结果，正极性直流叠加操作冲击的放电电压比正极性操作冲击的放电电压高 2%～4%。

从试验结果可以看出，±800kV 直流线路塔头间隙的叠加试验结果和±500kV 的基本一致，在进行直流线路塔头空气间隙设计时，从偏于安全考虑，可仍按正极性操作冲击放电电压来选取空气间隙距离。

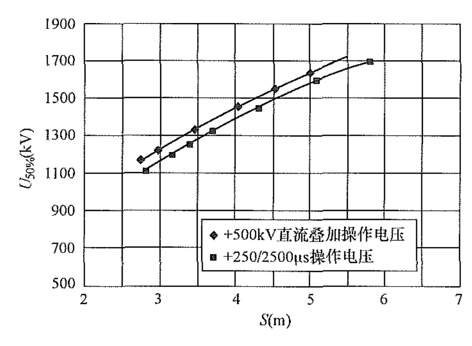


图 4-78 ±500kV 直流导线—塔身间隙的正极性直流叠加操作冲击放电特性

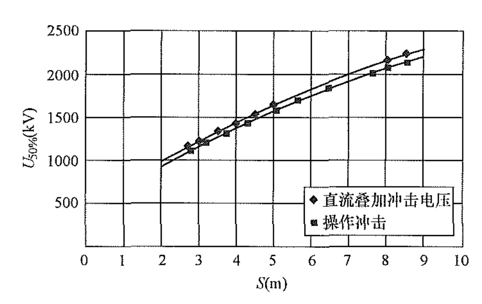


图 4-79 ±800kV 直流导线—塔身间隙的正极性直流叠加操作冲击放电特性

（五）空气间隙取值

表 4-36～表 4-39 分别给出了我国±400～±1100kV 直流输电线路在相应风偏条件下，带电部分与杆塔构件（包括拉线、脚钉等）的最小间隙。

表 4-36 ±400kV、±500kV、±660kV 单回路带电部分与杆塔构件的最小间隙

标称电压（kV）	±400kV		±500kV		±660kV	
海拔（m）	4500	5000	500	1000	500	1000
工作电压（m）	1.60	1.70	1.30	1.40	1.70	1.85
操作过电压 1.7p.u.	3.90	4.20	2.45	2.65	3.90	4.10

注 ±400kV 间隙为青—藏直流工程数据。

表 4-37 ±500kV 双回路带电部分与杆塔构件的最小间隙

标称电压（kV）	±500kV	
海拔（m）	500	1000
工作电压（m）	1.30	1.40
操作过电压 1.8p.u.	2.75	2.95
雷电过电压	4.2	

表 4-38 ±800kV 单回路带电部分与杆塔构件的最小间隙

标称电压（kV）	±800kV		
海拔（m）	500	1000	2000
工作电压（m）	2.1	2.3	2.5
操作过电压 1.6p.u.	4.9	5.3	5.9
雷电过电压	–		

表 4-39 ±1100kV 单回路带电部分与杆塔构件的最小间隙

标称电压（kV）	±1100kV				
海拔（m）	1000	1500	2000	2500	3000
工作电压（m）	3.2	3.5	3.7	4.0	4.2
操作过电压 1.5p.u.	8.1	8.4	8.7	9.0	9.2
操作过电压 1.58p.u.	8.9	9.2	9.5	9.7	9.9

注 准东—华东直流工程数据。

第八节 防雷保护与接地

直流线路雷电过电压的产生机理、影响因素和防护措施与交流线路基本类似，但其电压恒定，且系统采用电力电子元器件，在绝缘闪络特性、引雷特性和雷击防护等方面与交流线路有所不同。

一、直流输电线路雷电特性

（一）雷击保护特性

当线路遭受雷击闪络后，由于交、直流系统对线路的投切采用不同性质的元件完成，使得两者的雷击保护特性不同。

对于交流输电系统，当雷击架空输电线路引起绝缘闪络后，系统保护装置动作，断开线路两侧的断路器，切断故障电流，并在规定的时间内进行重合闸操作，线路恢复正常送电。

而对于直流输电系统而言，当线路遭受雷击闪络后，直流系统的控制保护系统启动，迅速将整流侧的触发角移相至 160° 左右，整流站转为逆变站运行，故障电流降为零。经过一段去游离时间之后，故障点熄弧，再启动直流系统恢复正常送电。

另外，直流线路与换流站换流阀之间用平波电抗器阻隔，可在一定程度上限制和降低从直流线路上侵入雷电波的幅值和陡度，从而也减少了对换流站的危害。

（二）线路闪络特性

对于双极直流线路，极导线上的运行电压极性相反，具有天然不平衡绝缘的特点。

从防雷角度来看，直流线路与交流线路最大的不同点在于其两极具有极性相反的稳定工作电压，这使得同等绝缘强度下两极线路的耐雷水平和引雷能力都有很大差异，绕击更为明显。对于负极性雷，正极线路的耐雷水平要低于负极。超高压交、直流线路的运行经验表明，对于广泛存在的负极性雷，绕击更易发生在直流线路的正极导线和交流线路的正半周期，即导线电压与雷电先导极性相反时引雷能力更强。也就是说正极线路更容易产生迎面先导，发生绕击的概率高于负极线路。

当雷云电荷为负时，所发生的雷云放电为负极性放电，雷电流极性为负；反之，雷电流极性为正。统计资料表明，对于不同地形地貌，雷电流正负极性比例不同，负极性所占比例在 70%～90%。运行单位统计的 2003～2006 年±500kV 天—广、贵—广Ⅰ直流线路雷击运行统计数据也说明，正极性导线更容易发生雷击闪络，见表 4-40。

表 4-40 中国南方电网超高压公司广州局直流线路雷击闪络率统计

线路名称	地形	时间	闪络导线极性	闪络类型
天—广	水塘	2003 年 8 月 23 日	+	绕击
	山地	2004 年 8 月 11 日	+	绕击
	山地	2004 年 8 月 23 日	+	绕击
	山地	2004 年 9 月 19 日	+	反击
	平地	2004 年 9 月 21 日	+	绕击
	山地	2006 年 6 月 2 日	+	绕击
贵—广Ⅰ	山地	2006 年 5 月 4 日	–	绕击
	山地	2006 年 6 月 16 日	+	不明

此外，交流系统由于电压周期性变化，且存在过零点情况，雷击闪络需考虑建弧率问题；而对于直流线路，由于极导线电压恒定，建弧率为 1。

随着直流输电线路电压等级的不断提高，极导线电压在反击计算中的影响越来越大，如±1100kV 线路，极导线电压已经和空气间隙的雷电冲击 50%放电电压处于同一数量级。因此，在直流线路的反击计算时，应计及线路电压的影响。

（三）雷电危害及运行特点

对于交流输电线路，由于断路器设备对跳闸次数有一定限制要求，当跳闸达到或超过其规定的次数后，需要对断路器进行停电检修。所以，交流输电系统把“雷击跳闸率”作为线路的防雷性能指标。另外，雷击

交流输电线路造成闪络时，单极故障电流会很大，有时会烧坏绝缘子。所以，运行人员需寻找故障点，必要时还需更换绝缘子，这也是必须控制交流线路雷击跳闸率的因素之一。

直流输电系统是通过控制整流侧移相来切断故障电流，直流系统采用线路雷击闪络率作为防雷性能指标。雷击直流架空输电线路发生绝缘闪络时，直流短路电流也较大，也可能会烧坏绝缘子，这与交流架空输电线路相同，因此，尽管直流输电线路很容易切除雷击闪络故障，其闪络率也应控制在一定范围内。

我国交流输电线路的雷击跳闸运行统计数据（折算到年平均 40 个雷暴日）为：110kV 为 0.525 次/（100km·a）；220kV 为 0.315 次/（100km·a）；330kV 为 0.2 次/(100km·a)；500kV 为 0.14 次/(100km·a)。

表 4-41 给出了 2004～2007 年间部分±500kV 直流线路的雷电闪络情况。

表 4-41　部分±500kV 直流线路雷电闪络情况统计（2004～2007 年）

线路	线路长度（km）	雷击闪络次数					雷击闪络率[次/(100km·a)]
		2004	2005	2006	2007	合计	
葛—南	1045	4	0	3	4	11	0.26
三—常	895	1	2	1	4	8	0.22
三—广	940	1	2	4	4	11	0.29
三—沪	1070	—	—	—	5	5	0.47
						平均	0.28

中国南方电网公司 2011 年±800kV 直流线路雷击闪络 1 次，雷击闪络率为 0.073 次/（100km·a）；±500kV 直流线路雷击闪络 9 次，雷击闪络率为 0.295 次/（100km·a）。

2005～2011 年，中国南方电网公司部分直流线路雷击闪络率情况统计见表 4-42。

表 4-42　中国南方电网公司部分直流线路雷电闪络情况统计（2005～2011 年）

项目	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
直流雷击闪络率[次/（100km·a)]	0.27	1.402	0.328	0.885	0.328	0.565	0.2034

运行统计数据表明，我国±500kV 直流线路的雷击闪络率高于交流 500kV 线路雷击跳闸率的平均值[0.14 次/（100km·a)]，从收集的数据看，直流线路实际运行雷电闪络率一般大于 0.2 次/（100km·a)。±800kV 直流线路由于绝缘强度等设计标准较高，发生雷击闪络的概率低于±500kV 直流线路。

直流线路雷电过电压的危害一定程度上小于交流线路，但为提高系统运行可靠性，也应将直流线路的雷击闪络率控制在一定的水平，对直流线路的防雷设计提出相关要求。

二、防雷保护计算

在实际工程的防雷设计中，交、直流线路采用的方法基本相同，只需针对各自不同的特点加以区别，直流线路的防雷计算可参照第三章第九节中相关内容。

三、雷击档距中央地线

（一）雷击线路一般档距中央地线

雷击线路一般档距中央地线时，导地线之间的距离按照气温 +15℃、无风进行校验，相关规程给出了经验公式。

按照 DL 5497—2015《高压直流架空输电线路设计技术规程》，±500kV、±660kV 线路导地线档中距离应满足式（4-127）。

$$S \geqslant 0.012L+1.5 \tag{4-127}$$

式中　S——导线与地线间的距离，m；

L——档距，m。

GB 50790—2013《±800kV 直流架空输电线路设计规范》建议档距中央导线与地线之间的距离采用数值计算的方法确定。

根据国网电科院研究成果，一般档距中央，导线与地线距离也可按式（4-128）校验。

$$S \geqslant 0.015L+U_m/500+2 \tag{4-128}$$

式中　S——导线与地线间的距离，m；

U_m——系统最高电压，kV；

L——实际档距，m。

（二）雷击线路大档距中央地线

对于档距较大的情况，当按雷击线路档距中央地线来选定导线与地线间的距离时，采用式（4-128）和式（4-129）计算的距离往往过大，此时应按避免反击的条件进行计算。

当档距 $l > v\tau_t$（v 表示波的传播速度，一般取 225m/μs；τ_t 表示波头长度）时，来自杆塔的返回波在雷电流达到最大值之前尚未达到雷击点，此时，雷击点的电压最大值为

$$U=\frac{I}{2}\times\frac{z}{2} \tag{4-129}$$

式中　z——地线波阻抗，Ω；

I——耐雷水平，kA；

U——雷击点电压最大值，kV。

可以认为，一般情况下导线和地线基本平行，两者之间存在互感和线间电容，雷击地线时，在导线上将耦合出一个相应电压，则导线与地线间的距离宜符合式（4-130）要求。

$$S_1 \geqslant \frac{U(1-k)}{E_1} \tag{4-130}$$

式中 U——雷击点的电压最大值，kV；

k——考虑电晕时的耦合系数；

E_1——空气间隙平均击穿强度，kV/m；

S_1——导线与地线间的距离，m。

工程计算中，常取导线与地线间空气间隙平均击穿强度为700kV/m，考虑电晕时的耦合系数 k 取0.2，式（4-130）简化为

$$S_1 \geqslant \frac{U(1-k)}{E_1} = \frac{90I(1-0.2)}{700} \approx 0.1I \tag{4-131}$$

式中：S_1、U、k、E_1 代号含义与式（4-130）一致。

对于直流输电线路的耐雷水平，常规±500kV 输电线路雷击杆顶时直流线路耐雷水平达到 125～175kA，在大跨越档距中央和换流站进出线（2～3km）段，耐雷水平不小于 175kA。

科研单位根据宁东—山东±660kV 直流输电示范工程塔型和间隙尺寸计算得到，单回线路杆塔单极反击耐雷水平为 173kA～192kA，双极同时反击闪络的雷电流在 400kA 以上。

表 4-43 和表 4-44 给出了电科院、清华大学根据±800kV 向—上直流工程典型塔型尺寸和间隙，计算的反击耐雷水平。

表 4-43　±800kV 向—上直流工程反击雷电性能的计算（电科院计算）

工频接地电阻（Ω）	反击耐雷水平（kA）	反击闪络率［次/（100km·a）］
30	136	0.845
20	174	0.311
15	204	0.095
10	249	0.030
5	327	0.004

表 4-44　±800kV 向—上直流工程反击雷电性能的计算（清华大学计算）

工频接地电阻（Ω）	反击耐雷水平（kA）	反击闪络率［次/（100km·a）］
30	218	0.110
20	250	0.0475
15	270	0.0281
10	290	0.0167
5	316	0.0084

±800kV 向—上直流工程杆塔工频接地电阻在 10～15Ω 时，其反击耐雷水平大于 200kA。

根据瓦格纳和希尔曼的管—管预击穿电流理论，当导线和地线之间的冲击电压较大时，导地线间出现预击穿电流。预击穿电流可降低雷击点过电压，产生击穿时延，使得间隙不易击穿，因此，计算的雷击点的电压最大值对应的档距条件（$l > v\tau_t$）可适当放大。

实际工程设计中，根据具体情况，可将两根地线在档距中央附近设联结点，以降低雷击档距中央地线时的地线电压，起到降低档距中央导地线之间距离的目的。

四、接地设计

从防雷的角度，直流线路的接地与交流线路没有本质区别，GB 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》中对于杆塔接地装置的一般要求也适用于直流输电线路。直流线路接地装置的设计可参照第三章第九节中相关部分。

五、防雷接地的相关规定及措施

直流输电线路防雷设计应综合考虑线路的重要性、沿线雷电活动特点、地形地貌、土壤电阻率，结合沿线附近线路的运行经验，提出合理的防护措施。

（一）防雷设计的有关规定

GB 50790—2013《±800kV 直流架空输电线路设计规范》和 DL 5497—2015《高压直流架空输电线路设计技术规程》提出了防雷设计方面的相关要求，在输电线路防雷设计过程中应遵照执行。

1. GB 50790—2013 相关规定

（1）应结合当地已有的运行经验、地区雷电活动的强弱特点、地形地貌特点及土壤电阻率高低等因素进行±800kV 线路防雷设计；在计算耐雷水平后，应通过技术经济比较，采用合理的防雷方式。

（2）±800kV 线路应沿全线架设双地线。杆塔上地线对导线宜采用负保护角，在山区不宜大于−10°。

（3）档距中央导地与地线之间的距离宜采用数值计算的方法确定。

（4）雷季干燥时每基杆塔不连地线的工频接地电阻不应大于表 4-45 所列数值。当土壤电阻率超过 2000Ω·m，接地电阻很难降到 30Ω 时，可采用 6～8 根总长不超过 500m 的反射形接地体或连续伸长接地体，其接地电阻可不受限制。

表 4-45　雷季干燥时每基杆塔不连地线的工频接地电阻

土壤电阻率（Ω·m）	100 及以下	100～500	500～1000	1000～2000	2000 以上
工频接地电阻（Ω）	10	15	20	25	30

（5）通过耕地的直流输电线路的接地体应埋设在耕作深度以下；位于居民区和水田的接地体应敷设成环形。

2. DL 5497—2015 相关规定

（1）直流线路的防雷设计，应根据线路电压、负荷性质和系统运行方式，结合当地已有线路的运行经验、地区雷电活动的强弱特点、地形地貌特点及土壤电阻率高低等因素，在计算耐雷水平后，通过技术经济比较，采用合理的防雷方式。

（2）高压直流架空输电线路应沿全线架设双地线。杆塔上地线对导线的保护角，不宜大于表 4-46 所列值。

表 4-46　杆塔上地线对导线的保护角

标称电压（kV）	±500		±660	
地形	平丘	山区	平丘	山区
单回路	10°		0°	−10°
双回路	0°		—	

（3）在一般档距的档距中央，导线与地线的距离，应按下式校验（计算条件为：气温 +15℃，无风）

$$S \geqslant 0.012L + 1.5 \tag{4-132}$$

式中　S——导线与地线间的距离，m；

L——档距，m。

（4）在雷季干燥时，每基杆塔不连地线的工频接地电阻，不宜大于表 4-45 所列数值。

（5）通过耕地的输电线路，其接地体应埋设在耕作深度以下，位于居民区和水田的接地体应敷设成环形。

（二）防雷设计的相关措施

除了上述通用的架设双地线、控制档距中央导地线间距、降低杆塔接地电阻、减小地线保护角等规程规定的手段外，还可采取一些特殊措施来进行防雷设计如加装耦合地线、安装线路避雷器等具体措施可参照第三章第九节（四）中相关内容。

第九节　地　　线

一、地线作用及选型

（一）地线的作用

直流输电线路的地线除主要用作防雷以外，还可具有其他方面的作用，如采用光纤复合架空地线（OPGW）时实现通信功能；作为屏蔽线以降低直流线路对通信线的影响；导线断线时提供支持力；地线按回流导体设计，实现“单极—金属回路”的单极运行方式等。

近年来，光纤复合架空地线（OPGW）在超/特高压直流输电线路上广泛应用。OPGW 作为直流输电线路的地线，必须和普通地线一样起到良好的防雷作用，OPGW 的力学特性要与另一根地线相当，且其结构要有足够的耐雷电流性能（GB 50790—2013《±800kV 直流架空输电线路设计规范》规定，光纤复合架空地线的最外层单线直径不应小于 3.0mm）。同时，其光纤单元要满足通信专业的要求，以实现系统通信功能。

直流输电线路的架空地线，对导线的静电场及电磁场感应具有一定的屏蔽效应，从而可降低对邻近的电信线路的危险和干扰影响。对于多点直接接地的地线，在直流输电线路正常运行时，可降低静电场对电信线路感应的危险电压，同时可降低谐波电压、谐波电流的平模和地模分量对电信线路感应的噪声计电动势；当直流输电线路在杆塔故障接地时，架空地线可有效地屏蔽极导线故障电流的电磁感应，同时架空地线由于分流作用具有一定的反向返回电流，多方面地降低了在电信线路上的电磁感应危险电动势。

当线路发生极导线断线（或具有较大纵向张力差）时，杆塔会沿线路方向倾斜，挂在杆塔顶部的地线挂点也发生偏移，相邻两档的地线由此产生张力差，该张力差对杆塔起支持作用，称其为地线支持力。但对于高电压等级线路，分裂根数越来越多，导线绝缘子串也很长，极导线断线的概率很低，在实际工程设计中，往往不进行地线支持力计算。

双极系统接线方式是直流输电工程常用的接线方式，当输电线路（或换流站）的一极发生故障（或检修）需退出工作时，为了提高系统供电可靠性和可用率，健全极继续运行，直流系统可转为单极大地回线运行方式。然而，随着电网的快速发展，直流输电线路越来越多，接地极的极址选择越来越困难，地电流对环境的影响问题也日趋突出，设置金属回线的方案成为一种选择。将地线按回流线设计是金属回线的一种，其形式选择除要满足防雷等要求外，还必须满足载流量的要求。

（二）地线的选择

地线型式的选择主要是要满足机械和电气两方面要求：

（1）地线（或 OPGW）的安全系数不应小于 2.5 且宜大于导线，悬挂点的设计安全系数不应小于 2.25；在稀有风速或稀有覆冰气象条件时，弧垂最低点的张力不应超过拉断力的 70%，特高压线路不应超 60%。悬挂点的最大张力不应超过拉断力的 77%，特高压线路不应超 66%；平均运行张力不超过破坏张力的 25%，（对于 OPGW，年平均运行张力不宜超过破坏张力的

22%)；导线和地线（或 OPGW）之间的距离应满足防雷要求。当一根地线采用光纤复合架空地线（OPGW）时，宜与另一根地线的弧垂特性相匹配。

（2）地线（或 OPGW）的形式要满足电力系统设计方面对线路参数的要求；线路发生故障时，地线（或 OPGW）要满足热稳定的要求。

需要说明的是，和交流输电系统比较，直流输电系统的短路电流较小并逐步衰减，持续时间也较短，短路容量一般较小，且近来直流输电线路的地线大都采用较大截面的铝包钢绞线或铝包钢丝铠装的 OPGW，热稳定问题不突出。当需要进行热稳定校验时，可参照第三章第十一节的方法进行计算。

当地线仅作为防雷措施时，可采用镀锌钢绞线或铝包钢绞线，其最小标称截面应与导线相配合。DL 5497—2015 规定：无冰区段，覆冰区段地线采用镀锌钢绞线时最小标称截面应分别不小于 $80mm^2$、$100mm^2$。

二、直流输电线路地线的表面电场强度

直流输电线路地线的表面电场强度的限制及计算方法参见本章第二节。

三、地线绝缘方式

对交流输电线路，地线的绝缘方式有三种——全线绝缘、分段绝缘单点接地和逐基直接接地方式。随着光纤通信的发展，光纤复合架空地线（OPGW）被广泛采用，为了确保光纤复合架空地线的运行安全，OPGW 大都采用逐基直接接地的方式，另一根普通地线则采用分段绝缘单点接地的方式，以降低地线的电能损耗。近年来，对 OPGW 也正尝试分段绝缘单点接地的绝缘方式（详见第三章第十一节）。

对直流输电线路，在正常运行时，极电流中的谐波分量很小，地线上的电磁感应电流极小，主要是极导线对地线的静电感应，其电能损失远远小于交流输电线路，直流输电线路的地线（或 OPGW）大都采用逐基直接接地的方式。当地线兼做金属回流线时，地线应绝缘，并考虑极电流在回流线（地线）上产生的电压降，以及操作过电压时在回流线（地线）上产生的影响等因素，确定其绝缘水平。

第十节 直流接地极线路

直流接地极线路是环流阀中性点工作接地的连接线，具有电压低，长期电流小，短时电流大（单极大地返回运行方式时）的特点。本章根据 DL/T 5224—2014《高压直流输电大地返回系统设计技术规范》的有关规定，给出接地极线路的导地线选择，绝缘配合、防雷接地、对地距离及交叉跨越等方面的设计方法，其他方面可按照一般线路，并参照 GB 50545—2010《110kV～750kV 架空输电线路设计规范》中关于 220kV 线路的相关条款执行。

一、设计气象条件

接地极线路是整个直流系统的一个组成部分，与直流线路具有相同的设计寿命。按照 DL/T 5224—2014，在确定接地极线路基本风速时，应采用离地面 10m 高处 30 年一遇 10min 年平均最大风速，且设计基本风速不应小于 23.5m/s。

二、导地线选择

（一）导线选择

接地极架空线路的导线截面宜按照允许载流量选择。钢芯铝绞线的允许温度宜取 80℃。在计算导线温度时，导线载流量为额定电流，环境温度宜采用最热月平均最高气温，风速宜取 0.5m/s，太阳辐射功率密度宜取 $0.1W/cm^2$。

接地极线路导线截面选择原则上仍按照一般输电线路的导线选择方法，并进行经济比较确定，但由于接地极线路大电流（单极返回方式运行）运行时间很短，所以，其经济性比较往往变为初投资的比较，发热条件成为导线截面的控制因素，即按照允许载流量选择导线截面。为了减小导线截面，降低建设投资，近来的接地极线路采用了耐热铝合金导线，并有采用碳纤维芯铝导线的趋势。

（二）地线选择

接地极线路地线的选择，可按照减小工程投资的原则，采用普通钢绞线，其机械性能要求与一般输电线路地线相同。接地极线路地线的安全系数不应小于导线的安全系数。

三、导线布置

接地极架空线路导线宜采用水平对称布置。接地极线路虽具有“单一极性”，但为了保持杆塔荷载平衡，通常还是将其分为两束导线对称地布置在杆塔两侧。按照 DL/T 5224—2014，对于在 1000m 以下档距，水平“极”间距离宜按式（4-133）计算

$$D = 0.5 + 0.65\sqrt{f_c} + A \qquad (4\text{-}133)$$

式中 D——导线水平极线间距离，m；

f_c——导线最大弧垂，m；

A——覆冰线间距离增大常数。

重覆冰的水平线间距离应根据运行经验确定，当缺乏经验时，可较式（4-133）要求值加大 5%～15%，重冰区可取上限值。

四、绝缘配合

现行 DL/T 5224—2014 设计规程规定：接地极架空线路的绝缘配合，应满足直流系统以单极大地返回方式运行时，线路在额定电流、最大过负荷电流和最大暂态电流以及内过电压、外过电压（雷电过电压）条件下安全可靠运行。

对接地极线路，电气方面的安全威胁主要来自于绝缘被击穿后的直流续流，该电流可能会烧坏绝缘子或金具。为了消除直流续流，绝缘配合设计可采取两项措施：一是适当增加接地极线路的绝缘水平，防止绝缘闪络；二是在绝缘子串两端加装招弧角，一旦发生闪络，希望能保护绝缘子并帮助拉断电弧。此外，在仍不能熄弧的情况下，要求保护装置发出闭锁指令。

（一）接地极线路上的电压

1. 工作电压

接地极线路首端连接换流站中性点，末端连接接地极，其直流工作电压实际上是直流入地电流在接地极和接地极线路电流在接地极线路上的压降，并呈线性下降趋势。在额定电流或最大过负荷电流时，接地极线路上点 P 处对地的直流运行电压可用式（4-134）计算

$$U_p = I_d R_e + I_L R_o L_p \tag{4-134}$$

式中 U_p——接地极线路点 P 处的电压，V；

I_d——流过接地极的（入地）电流，A；

I_L——流经接地极线路上的电流，A；

R_e——接地极的接地电阻，Ω；

R_o——接地极线路单位长度线路的电阻，Ω/km；

L_p——点 P 离开接地极的距离，km。

对共用接地极，式（4-134）中 I_d 是一个复合电流，且该复合电流最大值不应小于其中一个换流站最大额定电流与另一个换流站最大暂态电流之和。

对于非共用型接地极，因 $I_d=I_L$，所以式（4-134）可以写成

$$U_p = I_d(R_e + R_o L_p) \tag{4-135}$$

工作电压是沿着换流站至接地极方向逐渐衰减的，且仅在单极大地返回过负荷运行时，接地极线路上的工作电压最高。

2. 内过电压

当直流系统发生换向失败（丢失脉冲）、直流接线方式转换、换流器短路故障和直流极（线路）接地故障时，在接地极线路上可能产生内过电压。

内过电压大小除了与短路电流（系统条件）有关外，还与接地极及其线路长度等参数因素有关，具体工程的内过电压情况需要采用专业软件计算，一般情况下，最大内过电压值不超过 300kV。

3. 外电过电压

接地极线路上外过电压（雷电过电压）的大小，主要取决于雷电流波头、幅值及雷电波阻抗，与常规线路的雷电过电压计算方法没有本质上的差别。

（二）绝缘子片数

1. 与换流站中性点绝缘水平匹配

换流站中性点绝缘水平是由母线上避雷器（接地极线路侧）的雷电保护水平决定的。对接地极线路的绝缘水平，一是要求尽可能高于内过电压水平，以避免接地极线路在内过电压下发生绝缘击穿；二是应稍低于中性点母线的保护水平，以确保换流站内设备安全。换言之，靠近换流站附近的接地极线路的绝缘水应介于内过电压与中性点母线的保护水平之间。实际工程中，接地极线路的最高绝缘水平常取 0.95 倍的中性点母线电压保护水平。

2. 按工作电压选择绝缘子片数

常规直流输电工程接地极线路的最高工作电压一般都不高，只需采用一片 XZP-160 型直流绝缘子就可以满足工作电压下的绝缘水平要求。但考虑到绝缘子存在“零值”的可能性，所以，接地极线路宜采用直流盘式绝缘子，其片数不得少于 2 片，并装设招弧角。

3. 按内过电压选择绝缘子片数

迄今为止，接地极线路发生事故原因多半是由内过电压闪络后续流无法熄灭所致。因此适当提高线路绝缘水平，防止内过电压发生击穿，可以大幅度降低接地极线路安全风险。避免接地极线路在内过电压条件下发生闪络成为选择绝缘子片数的控制条件。

设计时可根据工程实际内过电压水平，按照招弧角和绝缘子片数（间隙）配合下的内过电压耐受水平，选择绝缘子片数。根据试验结果，单片 XZP-160 型直流绝缘子的内过电压耐受值可取 50～54kV。

基于接地极线路上内过电压沿换流站至接地极方向呈衰减分布的特点，绝缘子片数可根据内过电压情况，采取由高到低的差异化配置。

4. 外过电压下的绝缘子片数

按满足外过电压（雷电过电压）下不发生闪络的要求来配置接地极线路绝缘子片数是不经济的，也是不现实的。换言之，允许接地极线路在雷电过电压下发生闪络，但应注意由此引发的续流问题。这是当前雷电过电压下接地极线路绝缘配合设计的原则之一。

结合当前国内直流输电工程建设情况（接地极线路长度、导线型号及内过电压水平等），表 4-47 列出了（海拔 1000m 及下地区）接地极线路最少绝缘子片数的典型配置，以供参考。

表 4-47 国内接地极线路最少绝缘子片数典型配置（R_0=5Ω）

击穿点距接地极距离/接地极线路长度（km）	不同额定电流下最少绝缘子片数					
	1200A	1800A	3000A	4000A	5000A	6000A
0.2	2	2	3	3	3	4
0.4	2	2	3	4	5	6
0.6	2	3	5	6	6*	6*
0.8	3	3	5*	6*	6*	6*
1.0	3	4	5*	6*	6*	6*

* 表示招弧角不能熄弧，需要启动“闭锁保护”熄弧；工程条件不同可能有些差异。

（三）绝缘子串招弧角

接地极线路在过电压，尤其是外过电压情况下很容易发生闪络，当单极大地返回运行时，一旦发生闪络，由于直流电流没有过零点，直流续流很难熄弧，会将绝缘子或金具烧毁，甚至发生掉线事故，因此，在接地极线路绝缘子串的两端应加装招弧角，并配有拉弧角。

招弧角的间隙应根据其被击穿后的直流续流大小合理取值，同时，应小于 85%的绝缘子有效串长，以保证在过电压下被击穿，有效保护绝缘子，且招弧角的间隙应大于直流续流的熄弧间隙，从而能断开直流续流。

目前，招弧角的形式主要有天沟型、羊角型和耐张型。

（1）天沟型招弧角。天沟型招弧角是以前用得较多的一种垂直布置的型式。试验结果表明，当电弧运动至招弧角末端时，弧根并未停留在招弧角电极末端，而是沿着招弧角外延移动，甚至会移向绝缘子串，危害绝缘子串安全。这主要是由于当电弧运动到末端时，电弧呈现水平布置，此时电磁力和热浮力均向上，导致上电极的弧根继续沿着电极向上运动。因此，天沟型招弧角结构存在设计缺陷，不宜采用或需要改进。

（2）羊角型招弧角。该型招弧角的端点引弧后，电弧由端点向外发展、拉长电弧直至电弧熄灭，而不是向内发展，是所期待的特性。羊角型招弧角的“角”长和对地倾角应适当：适当增加“角”长有利于拉伸电弧长度，但不宜大于招弧角间隙长度；对地倾角宜保持在 45°左右，太小影响拉弧效果，太大影响电弧发展方向。

（3）耐张型招弧角。耐张型招弧角是目前广泛用于接地极线路耐张绝缘子串上的招弧角，水平布置。试验结果显示，当电弧点燃后，电弧随着热气流上升而上升，这有利于拉断电弧；在工程中使用时，应使耐张型招弧角在绝缘子串上方。

图 4-80 给出了某工程悬垂型（羊角型招弧角）和耐张型（耐张型招弧角）绝缘子串组装形式。

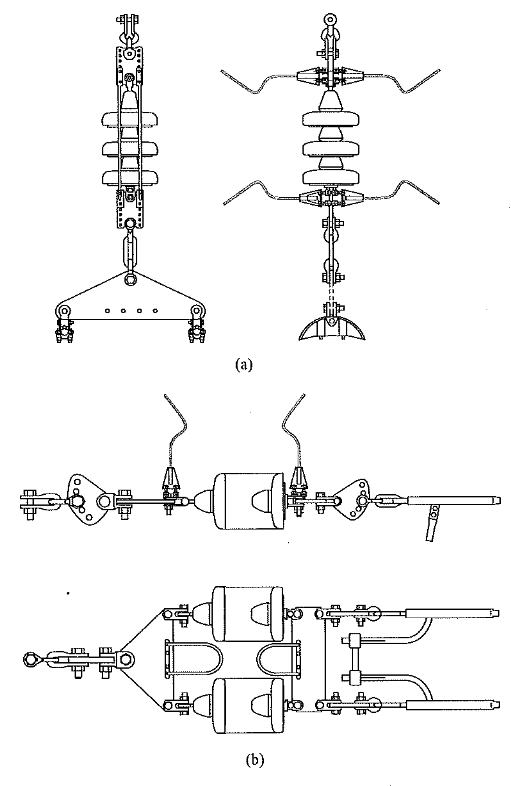


图 4-80 接地极线路悬垂型和耐张型绝缘子串组装形式

（a）悬垂型绝缘子串；（b）耐张型绝缘子串

（四）闭锁保护

随着特高压直流输电容量的不断增大，接地极线路发生闪络后的直流续流也将随之不断增大。特别地，当闪络发生在靠近换流站附近时，流过闪络点的续流将可能达到甚至超过 1/3 的额定电流。在此情况下，仅靠招弧角灭弧是困难的，可要求保护装置发出指令以“闭锁保护”，其技术思路是：通过监测接地极线路闪络发生位置，并根据当时的系统电流，判断闪络点续流大小；若续流超过某一值（招弧角临界熄弧电流），自动发出闭锁保护指令；电弧熄灭后，结束闭锁。

（五）空气间隙

关于直流输电接地极线路带电部分与杆塔构件的最小空气间隙问题，国内没有进行深入研究，目前，工程中按现行 DL/T 5224—2014 设计规程要求取值：

（1）带电部分与杆塔构件（包括拉线、脚钉）的间隙，在大风和雷电气象对应的风速下，分别不小于 0.1m 和 0.45m，高海拔地区应进行修正。

（2）在气温 15℃和风速 10m/s 的条件下，带电部

分对杆塔接地部件的校验间隙不应小于 0.6m，并应考虑 0.3～0.5m 的人体活动范围。

随着我国直流输电电压等级的进一步提高，系统的内过电压值也随之增加，接地极线路的绝缘水平也应相应提高。对于接地极线路带电部分与杆塔构件的空气间隙的取值，应能适应接地极线路上的电压情况。

按照上述接地极线路绝缘水平及配置方法，参照现行 GB 50545 和 DL/T 5224 设计标准，在相应的风偏条件下，与之相配的带电部分与杆塔构件的空气间隙可按表 4-48 取值。

表 4-48　接地极线路带电部分与杆塔构件的空气间隙　m

线路上绝缘子片数	<3 片	3～4 片	5～6 片
工作电压	0.1	0.2	0.25
内过电压	0.3	0.5	0.7
带电检修	0.6	0.8	1.0

注　一般可不考虑带电检修工况，如需考虑，还应考虑 0.3～0.5m 的人体活动范围。

五、防雷接地

因接地极线路是环流阀中性点工作接地的连接线，其绝缘水平很低，在一些国家和地区，接地极线路不架设地线。但架设地线可以增大与导线的耦合系数，可削弱雷电陡度和幅度，从而可以减少绝缘子遭受雷击时而损害的概率。我国线路设计规程也规定，110kV 及以上电压等级线路应全线架设地线，即使是 35kV 线路，也要求在靠近变电站 2～3km 范围里应架设地线。基于现行设计规程的要求，并考虑到架设地线增加费用很少，我国的接地极线路都是采用全线架设单根地线。

从防雷和安全角度上讲，人们希望接地极线路杆塔及其地线逐基接地良好。但为了防止入地直流电流腐蚀杆塔基础或者沿着地线返回到换流站，要求线路杆塔及其地线均对地绝缘。综合两者因素，目前接地极线路采取如下措施：

（1）所有的杆塔均接地，且对靠近接地极附近（距接地极至少 5km 以内）的杆塔，需采用单点连接线将杆塔与接地装置连接；

（2）在靠近接地极至少 10km（与接地极电位升有关）范围里，地线需采用绝缘子对杆塔绝缘。

当接地极线路使用了铁塔，地电流很容易在塔腿间流动，从而可能导致基础和塔腿的电腐蚀。为了防止产生电腐蚀，设计规程 DL/T 5224—2014 要求：对靠近接地极约 2km 以内的杆塔，基础对地、杆塔对基础应绝缘（在断开接地引下线情况下，接地装置与杆塔的接触电阻宜大于 500Ω）；此外，对靠近接地极 1km 以内的杆塔，杆塔对基础螺栓还应绝缘。

在雷雨季节，杆塔接地电阻与一般线路的要求相同。

六、对地距离及交叉跨越

DL/T 5224—2014 中规定，接地极线路走廊宽度、对地距离，原则上按照 GB 50545《110kV～750kV 架空输电线路设计规范》中关于 110kV 线路的设计标准执行。

接地极线路电压等级虽不高，但它是直流输电系统的组成部分。通常情况下，接地极线路应跨越 110kV 及以下电压等级的线路，尽可能钻越 220kV 线路，不得跨越 330kV 及以上电压等级的线路。

第五章

电线力学计算

电线力学计算是输电线路设计的重要环节之一。本章主要内容包括输电线路设计用气象参数的选取与组合，电线的种类与力学性能，架空电线在均匀和非均匀荷载下对连续档和孤立档在正常、断线、安装情况时的电线应力、弧垂和线长以及应力变化的状态方程等计算方法，并对因风、冰引起的电线振动、舞动的防护做了介绍。

第一节　气象参数选取与组合

一、气象资料收集的内容和用途

为使输电线路的结构强度和电气性能能够很好地适应自然界的气象变化，以保证输电线路的安全运行，在设计过程中，必须对沿线的气象情况进行全面的了解，详细收集设计所需要的气象资料。收集气象资料的内容及其主要用途见表 5-1。

二、气象资料的收集方法和气象分段

（1）为反映线路经过地区的实际气象情况，应收集线路两侧各气象台（站）的气象资料。所选气象台（站）应尽量靠近线路，距线路一般应不大于100km。

（2）若沿线路气象台（站）较少，且距线路较远时，除应加强对非专业性单位（如铁路、邮电、电业等）的调查访问外，可选更远的气象台（站）或向省级气象台收集资料以资参考判断，并将选定结果送交有关气象台（站）鉴定。

表 5-1　　气 象 资 料 及 用 途

序号	收集内容	用　　途
1	最高气温	计算电线的最大弧垂
2	最低气温	最低气温时电线应力计算，检查绝缘子串上扬或电线上拔及电线防振计算等
3	年平均气温*	一般用平均气温时电线的应力作防振设计
4	基本风速及相应气温	计算设计杆塔和电线强度的风荷载
5	地区最多风向及其出现频率	电线的防舞、防振、防腐及绝缘防污设计
6	电线覆冰厚度	杆塔及电线强度设计依据，验算不均匀覆冰时电线纵向不平衡张力及垂直布置的导线接近距离，可能出现最大弧垂时确定跨越距离
7	雷电日数（或小时数）	防雷计算
8	雪天、雨天、雾凇天的持续小时数	计算电晕损失
9	土壤冻结深度	杆塔基础设计
10	常年洪水位及最高航行水位气温	确定跨越杆塔高度及验算交叉跨越距离
11	最高气温月的日最高气温的平均值	计算导线发热温升

* 寒冷地区计算导线平均运行应力可采用年平均最低气温或冬季平均气温。

（3）调查风、冰灾情及群众反映：访问当地群众，进行风、冰灾情调查，这对缺乏气象观测资料的地区及需要验证气象资料准确性，都是很必要的。根据群众反映的自然物及建筑物的破坏情况，判断风、冰等

的严重程度。

(4) 气象资料以沿线的气象台站资料为主，结冰资料则应辅以电业、邮电、铁路及军事部门提供的各类电线结冰资料作为参考。

(5) 若沿线几个台（站）的记录值相差悬殊且线路较长（100km 以上），可考虑将全线划为若干个不同的气象区段，此时尚须注意：

1）分析差异原因，如观测台（站）的环境、测点高度、使用仪器及整个地形地貌特征等。

2）线路上不同气象区段的具体分界地点，应调查当地气象部门的资料结合地形地貌确定。

(6) 收集当地已运行线路的设计气象条件和与气象有关的运行情况。

(7) 利用 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》，按设计规定的重现期，将基本风压换算成基本风速，以供设计选择基本风速参照。

三、设计气象条件的选定原则

(1) 设计气象条件，应根据沿线的气象资料和附近已有线路的运行经验，按表 5-2 中规定的气象重现期，提出适当的风、冰与气温相组合的气象条件。若沿线的气象与表 5-3 典型气象区中的数据接近时，宜采用其中所列数值。

所谓重现期 T 的气象数据即 T 年一遇的气象数据，指每年出现等于或超过该气象数据的概率（或频率 p），$p=\frac{1}{T}$。如重现期 T 为 30 年，相当于 30 年一遇，即每年出现的概率 $p=\frac{1}{30}$。

表 5-2　线路设计规定的气象重现期

线路设计类别	重现期 T（年）
35～66kV 交流线路	30
110～330kV 交流线路	30
500～750kV 交流线路	50
1000kV 交流线路	100
±400～±500kV 直流线路	50
±800～±1100kV 直流线路	100

表 5-3　典型气象区

气象区		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ	Ⅸ
大气温度（℃）	最高	+40								
	最低	−5	−10	−10	−20	−10	−20	−40	−20	−20
	覆冰	−5								
	基本风速	+10	+10	−5	−5	+10	−5	−5	−5	−5
	安装	0	0	−5	−10	−5	−10	−15	−10	−10
	雷电过电压	+15								
	操作过电压、年平均气温	+20	+15	+15	+10	+15	+10	−5	+10	+10
风速（m/s）	基本风速	31.5	27.0	23.5	23.5	27.0	23.5	27.0	27.0	27.0
	覆冰	10*							15	
	安装	10								
	雷电过电压	15	10							
	操作过电压	0.5×基本风速折算到导线平均高度处的风速（不低于 15m/s）								
覆冰厚度（mm）		0	5	5	5	10	10	10	15	20
冰的密度（g/cm^3）		0.9								

* 一般情况下覆冰同时风速 10m/s，当有可靠资料表明需加大风速时可取为 15m/s。

注　覆冰厚度 15、20mm 为中冰区。

(2) 确定基本风速时，应按当地气象台、站 10min 时距平均的年最大风速为样本，并宜采用极值Ⅰ型分布作为概率模型。同时还应根据沿线气象资料的数理统计结果，结合所经地区按 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》风压图和风压值换算的基本风速，以及沿线风灾调查资料和附近已有线路的运行经验，综合分析，合理确定基本风速。基本风速的高度，对于一般输电线路应取离地面 10m，大跨越应取离历年大风

季节平均最低水位 10m。

（3）GB 50061—2010《66kV 及以下架空电力线路设计规范》、GB 50545—2010《110kV～750kV 架空输电线路设计规范》、GB 50665—2011《1000kV 架空输电线路设计规范》、GB 50790—2013《±800kV 直流架空输电线路设计规范》、DL 5497—2015《高压直流架空输电线路设计技术规程》规定：对山区输电线路，宜采用统计分析和对比观测等方法，由邻近地区气象台、站的气象资料推算山区的最大基本风速，并结合实际运行经验确定。当无可靠资料，宜将附近平原地区的统计值提高 10%选用。35～330kV 输电线路的基本风速，不宜低于 23.5m/s；500～1000kV 交流输电线路，±400～±1100kV 直流输电线路，基本风速不宜低于 27m/s。必要时还宜按稀有风速条件进行验算。

（4）GB 50061—2010《66kV 及以下架空电力线路设计规范》、GB 50545—2010《110kV～750kV 架空输电线路设计规范》、GB 50665—2011《1000kV 架空输电线路设计规范》、GB 50790—2013《±800kV 直流架空输电线路设计规范》、DL 5497—2015《高压直流架空输电线路设计技术规程》规定：轻冰区宜按无冰、5mm 或 10mm 覆冰厚度设计，中冰区宜按 15mm 或 20mm 覆冰厚度设计，重冰区宜按 20、30、40mm 或 50mm 覆冰厚度等设计，必要时还宜按稀有覆冰条件进行验算。

（5）GB 50061—2010《66kV 及以下架空电力线路设计规范》、GB 50545—2010《110kV～750kV 架空输电线路设计规范》、GB 50665—2011《1000kV 架空输电线路设计规范》、GB 50790—2013 《±800kV 直流架空输电线路设计规范》、DL 5497—2015《高压直流架空输电线路设计技术规程》规定：地线设计冰厚，除无冰区外，应较导线增加 5mm。地线设计冰厚增加 5mm，仅针对地线支架的机械强度。

（6）输电线路位于河岸、湖岸、高峰以及山（谷）口等特殊地形以及容易产生强风的地带，设计基本风速应较附近一般地区适当增大。

四、基本风速的选择

1. 基本风速统计值的计算

选取年最大风速数据时，气象台（站）一般应有连续 25 年以上的风速资料，而且宜全部采用自记风速记录。计算线路基本风速统计值时，应将当地气象台（站）连续自记 10min 时距平均的历年最大风速作统计样本，以极值 I 型分布函数作为概率统计模型，求出表 5-2 规定的重现期和基准高度下的风速值即为线路基本风速统计值。

我国早期的许多气象台（站）多采用风压板一天定时观测 4 次的 2min 平均风速。采用风压板的观测数据，人为的观测误差较大，再加上时次时距换算中的误差，其结果有一定的偏差。目前，各气象台（站）已累积了较多风杯式自记风速仪记录的 10min 平均年最大风速数据，现在基本风速统计大都是以自记风速仪的数据为依据。

（1）风速观测高度影响的换算。我国位于空旷地区（B 类区）的气象台（站）风速感应器的安装高度以往多在距地面以上 8～12m；城市市区内（C 类区）的气象台（站）的安装高度随周围建筑物的高度而变化。在进行同一观测高度的风速值换算时，宜选用该气象台（站）常用的风速观测高度，以便减少换算数据。按照 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》中的规定，风速随高度的变化用指数公式（5-1）计算。

$$v_i = v_x\left(\frac{h_i}{h_x}\right)^{\alpha} \tag{5-1}$$

式中 h_i、v_i——分别为距地面 10m 高和该高度处的换算风速，m/s；

h_x、v_x——分别为距地面以上的实际观测高度，m；该观测高度处的观测风速，m/s；

α——与气象台地面粗糙度有关的系数。

根据 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》，A 类区系指近海海面和海岛、海岸、湖岸及沙漠地区，取 α_A=0.12；B 类区系指田野、乡村、丛林、丘陵以及房屋比较稀疏的乡镇，取 α_B=0.15；C 类区系指密集建筑群的城市市区，取 α_C=0.22；D 类区系指有密集建筑群且房屋较高的城市市区，取 α_D=0.3。

（2）根据沿线气象台（站）的最大风速资料统计值进行计算。以各气象台（站）距地面 10m 高连续自记 10min 平均的历年最大风速作统计样本，采用式（5-2）所示的极值 I 型分布函数作为风速概率统计的模型，代入线路规定的重现期 T，即可求得该重现期下的最大风速 v_T。式（5-2）通常也称为极值分布的耿贝尔（E.J.Gurnbel）矩法。

$$v_T = \frac{-\sqrt{6}}{\pi}\times\left\{0.57722+\ln\left[-\ln\left(1-\frac{1}{T}\right)\right]\right\}\times\sigma_{n-1}+\bar{v} \tag{5-2}$$

$$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum(v_i-\bar{v})^2}{n-1}} \tag{5-3}$$

$$\bar{v} = \frac{\sum v_i}{n}$$

式中 v_T——气象台 10m 高处、重现期为 T 年的连续自记 10min 平均最大风速，m/s；

T——重现期，年；

σ_{n-1}——统计样本标准差；

$\bar{v}$——样本中的历年最大风速平均值，m/s；

v_i——样本中的每年最大风速，m/s；

n——样本中的风速总年数。

（3）利用基本风压分布图计算线路最大基本风速统计值。GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》所附全国基本风压分布图，是根据全国多个地点的气象台（站），选取 10～25 年的最大风速资料，按照我国基本风压的标准要求将不同风仪高度统一换算为离地 10m 高、连续自记 10min 平均的年最大风速。以该风速数据，经统计得出给定重现期的最大风速作为基本风速 v_0，按式（5-4）计算得出各地空旷地区的基本风压 w_0 为

$$\left.\begin{aligned} w_0 &= K_V v_0^2 \\ K_V &= \rho / 2 \end{aligned}\right\} \tag{5-4}$$

式中 w_0——风压分布图中的基本风压，kN/m²；

v_0——空旷地区距地 10m 高、给定重现期的连续自记 10min 平均的最大风速，称为基本风速，m/s；

K_V——风压系数；

ρ——空气密度，t/m³。

在标准状态下，即纬度 45°海平面处，标准大气压下，气温 15℃时的干空气风压系数为 1/1600。

工程设计时可根据实际从基本风压分布图中查知基本风压 w_0，代入式（5-4）即可求出某地区的基本风速 v_0。其他重现期 T 的风压值可根据 10 年和 100 年风压值按式（5-5）计算。

$$x_T = x_{10} + (x_{100} - x_{10}) \times \left(\frac{\ln T}{\ln 10} - 1\right) \tag{5-5}$$

式中 T——重现期，年；

x_{10}——重现期为 10 年基本风压，kN/m²；

x_{100}——重现期为 100 年基本风压，kN/m²。

2. 线路基本风速的选定

（1）线路基本风速应以本节三、设计气象条件中的选定原则所列标准选定。

（2）线路基本风速的取值应以沿线附近各气象台（站）大风资料经过统计取得的最大基本风速统计值作为依据。通常以距线路最近气象台（站）的数据结合沿线地形、大风风向等因素选择能代表线路风速的气象台（站）的风速数据选定。

（3）DL/T 5158—2012《电力工程气象勘测技术规程》条文说明第 3.3.4 条指出：工程地点设计风速的确定，应考虑参证气象站地形对设计风速的影响订正，应与地区风压分布图进行对比分析，应结合当地建筑物采用风速与调查大风资料进行综合分析。

（4）线路既通过平、丘地带又穿过山区的长线路，宜采用两个不同的最大基本设计风速段。当跨越山区峡谷、河道或位于暴露的山脊、顶峰，沿迎风坡及垂直于开口无屏障的山口、无屏障的山沟汇交口等线路的微地形段，一般可比山区风速再适当增大（如再增大 10%）。

（5）对远离气象台（站）的线路，主要应以当地运行电力线路和通信线路设计、运行状况以及风灾调查为依据。根据 GB/T 28591—2012《风力等级》，表 5-4 列出供调查用的风级等级特征及换算表。

表 5-4 风级等级特征及换算表

风力等级	海面海浪高（m）		海岸船只征象	陆地地面物征象	相当于空旷平地上标准高度 10m 处的风速（m/s）
	一般	最高			
0	—	—	静	静、烟直上	0～0.2
1	0.1	0.1	平常渔船略觉摇动	烟能表示风向，但风向标不能转动	0.3～1.5
2	0.2	0.3	渔船张帆时，每小时可随风移行 2～3km	人面感觉有风、树叶有微响，风向标能移动	1.6～3.3
3	0.6	1.0	渔船渐觉簸动，每小时可随风移行 5～6km	树叶及微枝摇动不息，旌旗展开	3.4～5.4
4	1.0	1.5	渔船满帆时，可使渔船倾斜一侧	能吹起地面灰尘和纸张，树枝摇动	5.5～7.9
5	2.0	2.5	渔船收帆（即收去帆之一部分）	有叶的小树摇摆，内陆的水面有小波	8.0～10.7
6	3.0	4.0	渔船加倍收帆，捕鱼需注意风险	大树枝摇动，电线呼呼有声，举伞困难	10.8～13.8
7	4.0	5.5	渔船停泊港中，在海者下锚	全树摇动，迎风步行感觉不便	13.9～17.1
8	5.5	7.5	进港之渔船皆停留不出	微枝折毁，人行向前，感觉阻力较大	17.2～20.7

续表

风力等级	海面海浪高（m）		海岸船只征象	陆地地面物征象	相当于空旷平地上标准高度 10m 处的风速（m/s）
	一般	最高			
9	7.0	10.0	汽船航行困难	建筑物有小损（烟囱顶部及平屋摇动）	20.8～24.4
10	9.0	12.5	汽船航行颇危险	陆上少见，见时可使树木拔起或使建筑物损坏严重	24.5～28.4
11	11.5	16.0	汽船遇之极危险	陆上极少，有则必有广泛损坏	28.5～32.6
12	14.0	—	海浪滔天	陆上绝少见，摧毁力极大	32.7～36.9
13	—	—	—	—	37.0～41.4
14	—	—	—	—	41.5～46.1
15	—	—	—	—	46.2～50.9
16	—	—	—	—	51.0～56.0
17	—	—	—	—	56.1～61.2

五、线路风速及风压高度变化系数

空气在地球表面流动时，由于与地面摩擦而产生摩擦力，这种摩擦力导致与地面相接近的气流方向和速度有很大变化。随着高度的增加，摩擦对风速的影响逐渐减小，因此，风速随高度而增加，在低气层中增加很快，而当高度很高时则增长逐渐减慢。从理论上看，风速沿高度的增大与地面的摩擦（粗糙程度）、地表基本风速、高度等主要因素有关。当线路杆塔高度或导、地线的平均高度不同于线路规定的基准高度 10m 时，其不同高处的风速或风压应乘风速或风压高度变化系数。其风速高度变化系数，则式（5-1）可写为

$$
\begin{aligned}
&\text{A类地区：} K_h^A = 1.133\left(\frac{h}{10}\right)^{\alpha_A}\\
&\text{B类地区：} K_h^B = 1.000\left(\frac{h}{10}\right)^{\alpha_B}\\
&\text{C类地区：} K_h^C = 0.738\left(\frac{h}{10}\right)^{\alpha_C}\\
&\text{D类地区：} K_h^D = 0.512\left(\frac{h}{10}\right)^{\alpha_D}
\end{aligned}
\tag{5-6}
$$

式中 h、K_h ——分别为风速距地面的高度，m，以及该高度处不同地类的风速高度变化系数；

α_A、α_B、α_C、α_D ——见式（5-1）。

根据不同类别线路规定的导线平均高度，结合 GB 50009—2012 给出的截断高度和梯度、风速高度代入式（5-6）求得不同地类距地面以上不同高度 h 处的风速高度变化系数 K_h，见表 5-5。

表 5-5　线路风速高度变化系数 K_h

离地面或海平面高度（m）	地面粗糙度类别			
	A	B	C	D
5	1.04	1	0.81	0.71
10	1.13	1	0.81	0.71
15	1.19	1.06	0.81	0.71
20	1.23	1.11	0.86	0.71
30	1.29	1.18	0.94	0.71
40	1.34	1.23	1.00	0.78
50	1.37	1.27	1.05	0.83
60	1.41	1.31	1.09	0.88
70	1.43	1.34	1.13	0.92
80	1.45	1.37	1.17	0.96
90	1.48	1.39	1.20	0.99
100	1.49	1.41	1.22	1.02
150	1.57	1.50	1.34	1.15
200	1.62	1.57	1.43	1.26
250	1.67	1.62	1.50	1.35
300	1.70	1.67	1.56	1.42
350	1.70	1.70	1.61	1.49
400	1.70	1.70	1.66	1.55
450	1.70	1.70	1.70	1.60
500	1.70	1.70	1.70	1.66
≥550	1.70	1.70	1.70	1.70

GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》列出了风压高度变化系数μ_z的计算公式。

$$\left.\begin{aligned}&\text{A类地区：}\mu_z^A=1.284\left(\frac{h}{10}\right)^{0.24}\\&\text{B类地区：}\mu_z^B=1.000\left(\frac{h}{10}\right)^{0.30}\\&\text{C类地区：}\mu_z^C=0.544\left(\frac{h}{10}\right)^{0.44}\\&\text{D类地区：}\mu_z^D=0.262\left(\frac{h}{10}\right)^{0.60}\end{aligned}\right\}\tag{5-7}$$

与此同时，该规范针对四类地貌，风压高度变化系数分别规定了各自的截断高度，对应 A、B、C、D 类分别取 5、10、15、30m，即高度变化系数取值分别不小于 1.09、1.00、0.65、0.51，梯度风高度分别不高于 300、350、450、550。现将风压高度变化系数μ_z的计算结果列于表 5-6。

表 5-6　线路风压高度变化系数 μ_z

离地面或海平面高度（m）	地面粗糙度类别			
	A	B	C	D
5	1.09	1	0.65	0.51
10	1.28	1	0.65	0.51
15	1.42	1.13	0.65	0.51
20	1.52	1.23	0.74	0.51
30	1.67	1.39	0.88	0.51
40	1.79	1.52	1.00	0.60
50	1.89	1.62	1.11	0.69
60	1.97	1.71	1.20	0.77
70	2.05	1.79	1.28	0.84
80	2.12	1.87	1.36	0.91
90	2.18	1.93	1.43	0.98
100	2.23	2.00	1.50	1.04
150	2.46	2.25	1.79	1.33
200	2.64	2.46	2.03	1.58
250	2.78	2.63	2.24	1.81
300	2.91	2.77	2.43	2.02
350	2.91	2.91	2.60	2.22
400	2.91	2.91	2.76	2.40
450	2.91	2.91	2.91	2.58
500	2.91	2.91	2.91	2.74
≥550	2.91	2.91	2.91	2.91

六、线路电线风压计算

（一）理论风压

风以恒定风速 v 垂直吹到平面上，在单位面积上所受到的压力，通常称为理论风压，其表示见式（5-4）。

空气密度 ρ 随气象台（站）的气压、气温、湿度而变化，其计算式为

$$\rho=\frac{0.001276}{1+0.00366t}\times\left(\frac{p-0.378p_{vap}}{100000}\right)\tag{5-8}$$

式中　t——空气温度，℃；

p——气压，Pa；

p_{vap}——水气压，Pa。

我国对风速的测量，用不同的仪表，维尔达式风压板和达因风管式风速仪都是利用风压换算成风速读数。换算时一般取ρ=1.25kg/m³（标准大气压下，气温为 10℃时的干燥空气密度）。这对高海拔地区由于ρ较小，测得的风速读数偏小，但气象部门并未根据当地空气密度进行风速订正。我国气象台（站）以往大多采用上述风压式测风仪，故对这类风速资料，在计算风压时仍取ρ=1.25kg/m³是正确的。但今后随着连续自记资料的增多，多采用风杯式测风仪，所测风速读数与空气密度无关，故计算风压时应采用当地的实际空气密度。表 5-7 列出我国部分地区大风时空气密度计算值，仅供参考。

表 5-7　我国部分地区大风时的空气密度 ρ

地区	纬度	海拔（m）	气温（℃）	空气气压（Pa）	水气压力（Pa）	空气密度（kg/m³）
海拉尔	49°13′	676.6	13.8	94111	133.3	1.142
武汉	30°38′	23.0	2.6	102451	640.0	1.292
哈尔滨	45°45′	145.1	2.8	97091	630.7	1.223

续表

地区	纬度	海拔（m）	气温（℃）	空气气压（Pa）	水气压力（Pa）	空气密度（kg/m³）
长春	43°52′	215.7	5.2	98278	533.3	1.229
沈阳	41°47′	44.3	12.3	99886	1000.0	1.215
塘沽	38°59′	5.0	14.0	100257	1093.3	1.212
北京	39°57′	52.3	12.5	100115	445.3	1.219
重庆	29°30′	260.6	12.1	98719	1093.3	1.202
成都	30°46′	553.4	20.8	101035	1405.3	1.192
赤峰	42°17′	575.4	2.6	93724	288.0	1.183
西安	34°15′	416.0	11.4	97189	940.0	1.186
南京	32°04′	61.5	20.6	100114	2246.6	1.178
青岛	36°04′	77.0	19.0	98478	2026.6	1.166
上海	30°11′	5.0	23.1	98530	2549.3	1.148
酒泉	39°50′	1478.2	9.0	85602	1.33	1.057
贵阳	26°34′	1071.2	18.91	88874	1854.6	1.052
昆明	26°02′	1893.3	17.6	80673	952.0	0.963

（二）电线风荷载计算

风作用于电线上产生的横向风荷载，并非上述理论风压与电线受风面之积，还要考虑电线体型系数、与风速大小有关的风压不均匀系数、与电压等级和风速大小有关的风载调整系数、与电线平均高度有关的风速高度变化系数以及风向与电线轴向间的夹角等影响。电线水平档距为 l_H 时的风荷载计算公式为

$$W_x = \alpha W_0 \mu_z \mu_{sc} \beta_c d l_H B \sin^2\theta \qquad (5\text{-}9)$$

$$w_0 = v^2 / 1600 \qquad (5\text{-}10)$$

式中 W_x ——垂直于电线方向的水平风荷载标准值，kN；

μ_z——风压高度变化系数，基准高度为 10m 的风压高度变化系数按表 5-6 的规定确定；

α ——风压不均匀系数，见表 5-8；

μ_{sc}——电线体型系数，见表 5-10；

β_c——500kV 及以上电压等级交、直流输电线路电线风荷载调整系数，见表 5-8；其他电压等级的线路取 1.0；

d ——电线的外径或覆冰时的计算外径；分裂导线取所有子导线外径的总和，m；

l_H——杆塔的水平档距，m；

B ——电线覆冰后风荷载增大系数，5mm 冰取 1.1，10mm 冰取 1.2，15mm 冰取 1.3，20mm 及以上冰区取 1.5～2.0；

θ ——风向与电线方向之间的夹角，（°）；

w_0——基准风压标准值，kN/m²；

v ——基准高度为 10m 的风速，m/s。

1. 电线风压不均匀系数 α

沿整个档距内电线各点的风速，不可能都相同，其不均匀度随风速、档距增大而加大，为考虑整档电线所受风荷载与设计选用整档同一的风速相吻合，采用一个风压不均匀系数。该系数还分两种情况：

（1）计算电线作用于杆塔上的风荷载时所采用的 α，见表 5-8；

（2）为计算直线杆塔上导线及悬垂绝缘子串风偏角，校验电气间隙时所采用的 α 见表 5-9（计算耐张杆塔上的跳线风偏角时 α=1）。

电线风压不均匀系数 α 和电线的风荷载调整系数 β_c 均列于表 5-8 中，风压不均匀系数 α 随水平档距变化取值见表 5-9。

表 5-8　　电线风压不均匀系数 α 和电线的风荷载调整系数 β_c

风速（m/s）		<20	20≤v<27	27≤v<31.5	≥31.5
α	计算杆塔荷载	1.00	0.85	0.75	0.70
	设计杆塔（风偏计算用）	1.00	0.75	0.61	0.61
β_c	计算 500kV 及以上杆塔荷载	1.00	1.10	1.20	1.30

表 5-9　　风压不均匀系数 α 随水平档距变化取值

水平档距（m）	≤200	250	300	350	400	450	500	≥550
α	0.80	0.74	0.70	0.67	0.65	0.63	0.62	0.61

2. 电线体型系数及风向因素 $\sin^2\theta$

物体所受到的实际风压与物体的体形和气流方位有关，这种影响通常以体型系数的大小来表示（亦称空气动力系数），即物体体形对风阻力大小的系数。如流线型，表面光滑的物体就是减小体型系数的典型。在同样受风面和风速下，流线型所受的风压要小。对于规程规定的电线体型系数，是以水平风向与电线轴线成 90° 时的值。其实考虑风向方位的 $\sin^2\theta$ 亦是体型系数的范围。风向与电线轴线垂直时的体型系数列于表 5-10 中。

表 5-10　　电线受风体形系数 μ_{sc}

表面状况	无冰时		覆冰时
电线外径 d（mm）	$d<17$	$d\geq17$	不论 d 大小
μ_{sc}	1.2	1.1	1.2

3. 电线的风荷载调整系数 β_c

该项风压增大系数是考虑 500kV 及以上电压等级交、直流输电线路因绝缘子串较长、子导线多，有发生动力放大的可能，且随风速增大而加剧。为提高输电线路杆塔安全度而专设的一项风载调整系数，其数值列于表 5-8 中。

七、电线覆冰厚度的选择

当天空中的过冷却水滴及湿雪下降碰到地面上低于 0℃的冷物体后，便会在物体表面冻结成冰。由于气候条件和地理条件的不同，覆冰种类大致可分雾凇和雨凇两类。雾凇密度较轻（约 0.1×10^3～0.4×10^3kg/m³），呈针状或羽毛状结晶，冻结不密实。雨凇密度则较大（约 0.5×10^3～0.9×10^3kg/m³），冻结成浑然一体的透明状冰壳，附着力很强，电线覆冰常指这类雨凇而言。

形成雨凇的气象条件多在 0～-10℃，风速 5～15m/s，湿度约 80%以上。覆冰和地理条件也很有关系，地形条件能促使过冷却雨下降外，其他如平原中的突出高地，暴露的丘陵顶峰及高海拔地区、迎风山坡、垭口、风道、水面上空等覆冰相对比较严重。

由于目前电线覆冰方面的气象观测资料积累不多，因此设计输电线路时，要特别注意调查线路通过地区附近的已有电力线，通信线及自然物上的覆冰情况并沿新建线路所经地区进行覆冰调查访问（如覆冰地区树枝末端呈下垂状或折断下垂情况等），根据线路地形的具体特点、确定设计覆冰厚度。对于严重覆冰的微地形地段，可自成耐张段单独考虑不同的冰厚。当无可靠的覆冰记录时，在常年最低气温零度以下的，应考虑电力线覆冰，其冰厚度不小于 5mm，密度按 0.9×10^3kg/m³ 计算。

电线覆冰厚度系指覆冰成圆形的厚度，然而实际覆冰断面可能呈各种不规则形状。测量方法有很多种，一般常用方法有测记长径及短径，然后以其平均直径作为覆冰成圆形的直径，或以长径、短径作为椭圆计算面积，再以此面积作为圆形面积折算出圆形直径，也可量电线的覆冰断面周长作为圆周长折算出圆形直径。但这些方法只能反映实际线路上的覆冰厚度，由于不知冰的密度，难以折算成设计要求的冰厚。比较准确的方法是在线路覆冰时的现场截取一段覆冰的电线（电线断线时易办到），计量电线覆冰后单位长度的总质量 m_3，用式（5-11）折算出覆冰厚度 δ 为

$$\delta=\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2+\frac{(m_3-m_1)}{\pi\rho_i}\times10^6}-\frac{d}{2} \tag{5-11}$$

式中　m_3——电线每米覆冰后总质量，kg/m；
m_1——无冰时每米电线质量，kg/m；
ρ_i——覆冰密度、设计采用 900kg/m³；
d——无冰时电线外径，mm；
δ——电线覆冰厚度，mm。

当从现场覆冰电线上剥掉一段纯冰，计量得到电线单位长度覆冰质量 $m_2=(m_3-m_1)$kg/m 时，将其代入式（5-11）同样也可算得电线的覆冰厚度 δ。

对确认的个别严重覆冰地段，在经济、技术条件许可下，选择路径时尽量避开为宜。

八、计算用气象条件的组合

线路设计所选用的气象条件组合，除应合理地反映一定程度的自然变化规律外，还要适合整个结构上的技术经济合理性及设计计算上的方便性。因此，必须根据线路实际运行中可能遇到的情况，慎重地调查分析原始气象资料，合理地概括出组合气象条件。

（一）选择组合气象条件的要求

（1）线路在大风、覆冰及最低气温时仍能正常运行。

（2）线路在断线及不平衡张力情况下，不使事故范围扩大，即杆塔不致倾覆。

（3）线路在安装过程中不致发生人身或设备损坏事故。

（4）线路在特殊区段的稀有气象验算条件下，不致发生杆塔倾覆和断线。

（5）线路在正常运行情况下，在任何季节里，导线对地面或与其他地物保持足够的安全距离。

（6）线路在长期运行中，应保证导线或地线有足够的耐振动性能。

（二）线路正常运行情况下的气象组合

线路在正常运行中使电线及杆塔产生较大受力的气象条件，不外乎出现大风、覆冰及最低气温这三个因素。但根据气象规律不应该把这三个因素的极值都组合在一起，而是分别考虑三种气象组合。一般考虑最大风时不覆冰，气温取该地区发生大风月的平均气温或稍低一些。考虑电线覆冰时，根据雨凇形成规律，一般取相应的风速为 10m/s，若该地区基本风速折算到导线平均高处最大风速很大（如 35m/s 以上）时，可取相应风速为 15m/s，覆冰时气温取−5℃。考虑最低气温时不出现冰、风。

（三）线路安装和检修情况下的气象组合

线路要考虑一年四季中有安装、检修的可能（这里仅指机械性作业），但在严重气象条件时，则应暂停。GB 26859—2011《电力安全工作规程 电力线路部分》规定：

线路施工安装作业应在良好的天气下进行，遇有 6 级以上大风以及雷电、暴雨、冰雹、沙尘暴、极端气温等恶劣天气时，应停止工作。

线路带电作业应在良好的天气下进行。如遇雷电（听见雷声，看见闪电）、雪、雹、雨、雾等不得进行带电作业；风力大于 5 级时，或湿度大于 80%时，不宜进行带电作业。

据此，安装、带电作业情况下的气象条件按风速为 10m/s、无冰考虑。线路施工安装气温应按下列规定取值：

（1）最低气温为−40℃的地区，宜采用−15℃；

（2）最低气温为−20℃的地区，宜采用−10℃；

（3）最低气温为−10℃的地区，宜采用−5℃；

（4）最低气温为−5℃的地区，宜采用 0℃。

线路带电作业气温可采用 15℃。但对其他特殊情况，如冰、风事故中的抢修或安装途中出现大风等，只有靠安装时用辅助加强措施来解决。

（四）平均运行应力的气象条件组合

线路设计中，应保证电线在长期运行中有足够的耐振性，其中电线静态应力越高，振动越显严重，因此需要将振动时的静态应力控制在一定的限度内，而这一应力在实际运行中是经常随气象变化而改变的。为了概括出经常引起振动的应力平均值，并作为电线设计应力控制条件之一，需要归纳出平均运行应力的气象组合。

低温时电线的综合应力较大，易产生微风振动一般采用规程规定的年平均气温。而按照现行设计规范规定，当地区实际的年平均气温在 3～17℃之间时，设计用年平均气温宜取与年平均气温邻近的 5 的倍数数值；当地区实际的年平均气温小于 3℃和大于 17℃时，设计用年平均气温分别按年平均气温减少 3℃和 5℃后，取与此数邻近的 5 的倍数值。

我国地域辽阔，气温差异大，尤其是黑龙江北部及内蒙古东部寒冷地区按设计规范取年平均气温作为电线应力设计，导致多处线路平均应力大，易发生导线微风振动现象。经调查发现，导线微风振动现象多发生在冬季，原因是寒冷地区冬季平均气温与年平均气温相差较大，且一年内持续时间可长达 5～7 个月，按现行设计规范的规定选用年平均气温控制导线平均运行应力时，其冬季实际运行应力远大于年平均运行应力（25%RTS），这就更容易引起导线振动。

近年来，在实际工程中针对黑龙江北部及内蒙古东部寒冷地区（分一般地区及易振区）因地制宜地采用了不同平均气温作为电线应力控制条件，在导线防振方面取得了良好的效果。

国内 16 个城市的三种平均气温，见图 5-1 所示。

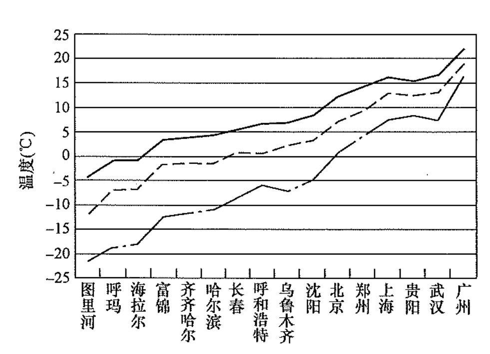


图 5-1 三种平均气温相对关系图

注：1. 年平均最低气温，指每月最低气温的年平均值，取多年平均值。

2. 冬季平均气温，指在城市采暖期内每月平均气温的平均值，取多年平均值。

图 5-1 可以看出，我国中部及南部地区，三种气温相差不大，而我国北部寒冷地区这三种平均气温相差较大，长春及以北地区相差可达 14～18℃，气温相差大，则电线应力相差就会明显加大。通过 400～1000mm² 三类（钢芯铝绞线、铝合金芯铝绞线及中强度铝合金绞线）导线进行导线应力计算，并以海拉尔及郑州两地进行了对比，由计算结果可以看出，两地均以现行设计采用的年平均气温且导线应力不超过其

破断力的 25%作为控制条件，则在冬季平均气温条件下，郑州地区导线最大平均运行应力均在拉断力的 24.9%～27.3%范围内且持续时间较短，而海拉尔地区导线的最大平均运行应力则达其拉断力的 27.7%～28.6%，远超过导线平均运行应力不宜超过导线拉断力 25%的要求，且持续时间可达 5 个月（11 月至次年 3 月）之久。这就会对导线防振带来不利影响。因此，建议：

（1）寒冷地区的易振区，导线平均运行应力（张力）的计算气温宜选用冬季平均气温。寒冷地区的易振区指容易引起导线微风振动的地区，如开阔平原、草地、低缓丘陵等地区。寒冷地区的一般地区（简称为寒冷地区）指除易振地区外的其他地区。

（2）寒冷地区的一般地区，导线平均运行应力（张力）的计算气温宜选用年平均最低气温。

（五）线路断线及不均匀覆冰情况下的气象组合

GB 50061—2010《66kV 及以下架空电力线路设计规范》、GB 50545—2010《110kV～750kV 架空输电线路设计规范》、GB 50665—2011《1000kV 架空输电线路设计规范》、GB 50790—2013《±800kV 直流架空输电线路设计规范》、DL 5497—2015《高压直流架空输电线路设计技术规程》规定，10mm 及以下冰区的线路，断线气象条件的组合为–5℃、有冰、无风，导、地线垂直冰荷载取 100%设计冰荷载；不均匀覆冰情况下的气象组合为–5℃、10m/s，导、地线垂直冰荷载取 75%设计冰荷载。

（六）绝缘配合情况下的气象组合

（1）运行电压气象条件与正常最大设计风速条件相同。

（2）操作过电压气象条件的气温可采用年平均气温，风速取基本风速折算到导线平均高度处值的 50%，但不宜低于 15m/s，且无冰。

（3）雷电过电压气象条件的气温采用 15℃，当基本风速折算到导线平均高度处其值大于或等于 35m/s 时风速取 15m/s，否则取 10m/s；校验导线与地线之间的距离时，风速应采用无风，且无冰。

第二节 电线的机械特性

一、电线的种类和选用

（一）电线的选用原则

输电线路的导线和地线（统称电线）长期在旷野、山区或湖海边缘运行，经常耐受风、冰等外荷载的作用，气温的剧烈变化以及化学气体等的侵蚀，因此，在设计中对电线的材质、结构等必须慎重选取。选定电线的材质、结构一般应考虑下述原则：

（1）导线材料应具有较高的导电率。但考虑国家资源情况，一般不应采用铜线。

（2）导线和地线应具有较高的机械强度和耐振性能。

（3）导线和地线应具有一定的耐化学腐蚀能力。

（4）选择电线材质和结构时，除满足传输容量外还应保证线路的造价经济和技术合理。

（二）电线的种类和用途

随着电网的不断发展，输电线路用导、地线的类型和品种越来越多，从导电材质来看，有普通电工铝线、软铝线、中强度铝合金线、高强（特高强）铝合金线、各种耐热及超耐热铝合金线，以及铝包钢线等；从支撑电线强度的材质来看，有钢线、殷钢线、铝基陶瓷纤维线、碳纤维和玻璃纤维混合线等；从电线线丝的形状来看，有圆线（线丝呈圆形）及型线（线丝呈 S 型、Z 型及 T 型）等；从电线成型产品的类型来看，有单一材质的电线（如铝绞线、铝合金绞线、钢绞线等），更多的是两种材质的组合电线（如钢芯铝绞线、碳纤维芯铝绞线、殷钢芯铝合金绞线等）。此外，尚有各种类型的扩径导线及间隙型导线。

现将国内较常见的电线品种简要介绍如下。

1. 圆线同心绞

圆线同心绞架空导线是国内输电线路最常用的导线种类，其典型结构如图 5-2 所示。根据使用的材质不同主要有钢芯铝绞线、铝包钢芯铝绞线、铝包钢绞线、铝合金芯铝绞线、全铝合金绞线等。

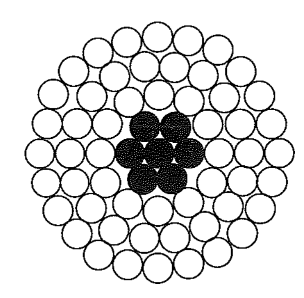


图 5-2 圆线同心绞电线典型结构图

（1）钢芯铝绞线。钢芯铝绞线的内层（或芯线）为单股或多股镀锌钢绞线，主要承担张力；外层为单层或多层硬铝绞线，为导电部分。对普通强度钢芯，铝钢截面比 m 在 12 以上的常称特轻型，用于变电站母线及小档距低压线路。m 在 6.5～12 的常称轻型，用于一般丘陵地区的高压线路。m 在 5～6.5 的常称正常型，用于山区及大档距线路。m 在 4～5.0 的常称加强型，用于重冰区及大跨越地段。m 在 1.72 以下的常称特强型，多作为良导体架空地线用。

（2）铝包钢芯铝绞线。铝包钢芯铝绞线的芯线为铝包钢绞线，主要承担张力；外层为单层或多层铝绞线，为导电部分。该种电线用于轻腐蚀地带及良导体

地线等。

（3）铝包钢绞线。铝包钢绞线的芯线为单股钢丝，外层包以铝层，作成单股及多股绞线。该种电线用于线路的大跨越、地线通信及导体地线等。

（4）铝合金芯铝绞线。铝合金芯铝绞线是一种铝合金和硬铝组合的导线，该导线内层采用高强度铝合金芯，外层采用常规的硬铝单丝绞合，综合利用了硬铝导电率高、铝合金强度高、质量轻的优点。铝合金芯铝绞线一般采用 52.5%IACS 或 53%IACS 高强度铝合金芯（对应 JLHA1 或 JLHA2）替代普通钢芯铝绞线中的钢芯和部分铝线，导线外部铝线可与普通钢芯铝绞线铝线相同，也可采用高导电硬铝线。

（5）全铝合金绞线。全铝合金绞线即所有股线为铝合金线的绞线，抗拉强度接近铜线，导电率和质量接近铝线。全铝合金绞线较钢芯铝绞线拉重比大，因而其弧垂特性好，可降低杆塔高度及耗钢量，对大气腐蚀具有抵抗能力，且避免了铝股线与钢线间的电化等腐蚀，运行寿命长。铝合金的布氏硬度约为 85，是铝线的 2 倍左右，但质量比钢芯铝绞线轻，可减少施工展放中导线表面的擦伤、磨损。

2. 型线同心绞

目前国内常用的型线导电层有铝丝、软铝丝以及铝合金丝等几种材质。绞线形状有四种类型，如图 5-3 所示。

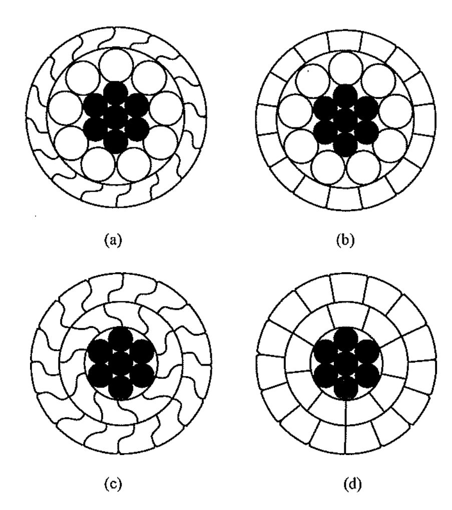


图 5-3 型线同心绞电线典型结构图

（a）外层为 S 型线；（b）外层为 T 型线；

（c）铝线股为 SZ 型；（d）铝线股为 TT 型

这种同心绞型线与普遍采用的圆线同心绞导线（如钢芯铝绞线）相比，直径更小，可以减少导线的覆冰和风荷载，同时较小的直径和平滑的外表面能减小空气动力系数，降低微风振动和舞动的危害，提高导线的抗化学腐蚀和缝隙腐蚀的能力。在直径相同的情况下，可以提高导线的电晕和无线电干扰水平。

SZ 型及 TT 型线的上述优点比 S 型及 T 型导线更为明显。它们与圆线同心绞导线相比，在相同截面时能减小直径 10%左右，在同等直径时可增大截面 20%～25%。

就 SZ 型与 TT 型两种线型来讲，SZ 型线结构紧密，单线间相互紧扣在一起不会形成单线跳出，T 型线虽然更容易加工成形，导线填充也紧密，但绞合后的导线却不十分服贴，常产生翘角现象。此外，SZ 型线间的接触面更大，导线的自阻尼性能表现更优。

3. 疏绞型扩径导线

目前使用的扩径导线主要有如下两种类型，如图 5-4 所示。

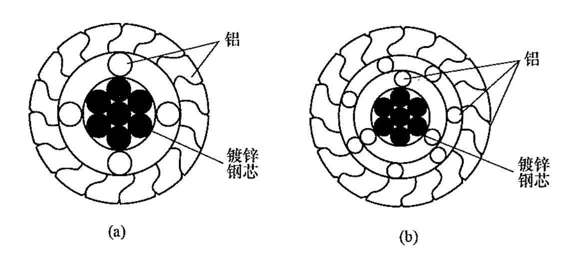


图 5-4 扩径导线典型结构图

（a）单层支撑架；（b）两层支撑架

扩径导线主要适用于高海拔地区。在高海拔地区，经常会出现导线截面能满足输送容量要求，但导线直径较小，满足不了可听噪声及无线电干扰限值的要求，若增加导线截面，势必会导致投资增加，造成浪费，采用扩径导线则可有效解决这一问题。

4. 间隙型导线

常见的间隙型导线有两种型式，如图 5-5 所示。

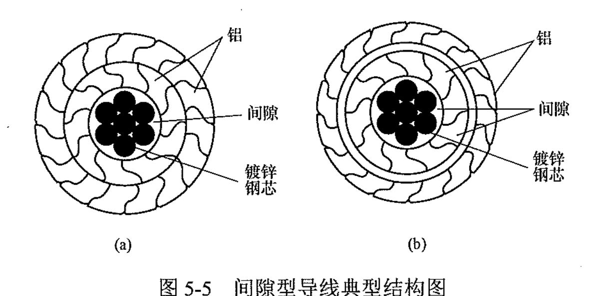


图 5-5 间隙型导线典型结构图

（a）一个间隙的导线；（b）两个间隙的导线

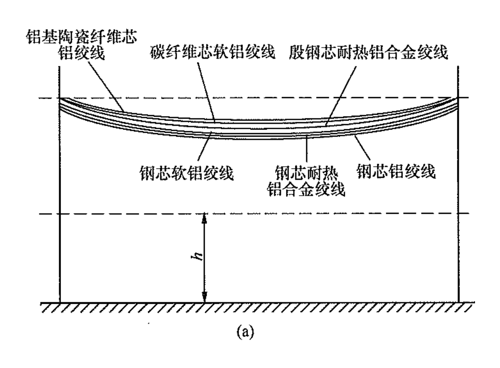
间隙型导线是在承载钢芯与外层绞合的铝导体之前有一定的间隙，间隙内填充防腐润滑剂。它能够在不增大导线截面的情况下，提高导线载流量，减少导线的弧垂，并且能够减小风阻、防腐蚀。间隙导线的施工方法与钢芯铝绞线相似，但必须采用定长放线的方式进行施工。

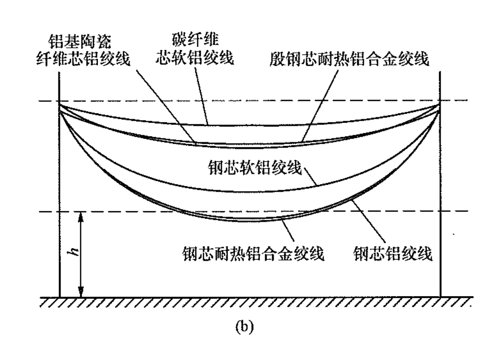
目前，国内技术改造项目及直流换流站接地极线

路中常采用耐热型导线，现将钢芯铝绞线及各种耐热型导线的综合性能比较列于表 5-11，以供设计人员参考使用。相应的各种导线因温度升高后的弧垂状态如图 5-6 所示。

表 5-11　　钢芯铝绞线与耐热型导线的综合性能比较表

导线类别	常规导线	耐热型导线					
主要特征	钢芯铝绞线	耐热铝合金	殷钢芯	碳纤维芯	铝基陶瓷纤维芯	软铝线	软铝型线
结构特色	常用的钢芯铝绞线	钢芯耐热铝合金绞线	殷钢芯耐热铝合金绞线	碳纤维芯软铝型线绞线	铝基陶瓷纤维芯耐热铝合金绞线	钢芯软铝绞线	钢芯软铝型线绞线
导电性能	硬铝线，导电率 61%IACS	耐热铝合金线，导电率 58% IACS 或 60% IACS	耐热铝合金线，导电率 58% IACS 或 60% IACS	软铝型线，导电率 63%IACS	耐热铝合金线，导电率 60% IACS	软铝线，导电率 63% IACS	软铝型线，导电率 63%IACS
允许使用温度（℃）	70，80	150	150	150 以上	150	150	150
弧垂特性	在允许温度下设计线路弧垂	使用至 90℃时弧垂超过要求值	可使用至 150℃，弧垂能满足要求	可使用至 150℃及以上，弧垂仍能满足要求	可使用至 150℃，弧垂可能满足要求，但要验算	能使用至 90℃以上，应校核弧垂值	能使用至 90℃以上，应校核弧垂值
能耗、线损与载流量	正常能耗和载流量	正常输电时，能耗和线损均增加。可允许增加 20%～25%的载流量	正常输电时，能耗和线损均增加。可允许增加约 100%载流量	正常输电时，能耗和线损都减少。可允许增加约 100%以上的载流量	正常输电时，虽耐热铝合金能耗较高，但其陶瓷纤维芯有较好的导电性，综合导电性较好	正常输电时，能耗和线损都减少。可允许增加 25%～30%的载流量	正常输电时，能耗和线损都减少。可允许增加 40%～50%的载流量
导线的外径与单重	作为常规使用的标准导线外径与单重	与相同规格的导线外径和单重相同	与相同规格的导线外径和单重相同	与相同规格的导线比，外径更小，单重也轻，减少 15%～18%	与相同规格的导线外径和单重相同	与相同规格的导线外径和单重相同	与相同规格的导线比，外径相同，单重增加 20%左右
导线拉断力	标准使用值	与标准相同	略小些	略大些	基本相同	基本相同	基本相同
金具	正常使用金具	需能耐 150℃金具	需能耐 150℃金具	需能耐 150℃金具，结构复杂	需能耐 150℃金具，结构较复杂	需能耐 150℃金具	需能耐 150℃金具
施工架设	正常施工架设	与常规导线相同	与常规导线相同	麻烦，特别是金具施工	麻烦，特别是金具施工	与常规导线基本相同	与常规导线基本相同
寿命	30～50 年	30～50 年	30～50 年	未获得可靠确切寿命年限（约 40 年）	未获得可靠确切寿命年限（约 40 年	30～50 年	40～50 年
价格	100%计（按质量计）	120%～125%	600%左右（现状）	600%左右（现状）	600%左右或略高些（现状）	120%～125%	130%～140%
应用领域	各种线路（除需增容的线路外）	只用于某些特定的增容线路，不适合用作主线路	只用于某些特定的增容线路，无法用作主线路	用于增容线路，也可用于重要的主线路	用于增容线路也可用于重要的主干线	用于主线路和某些特定的增容线路	用于主线路和某些增容线路
综合评价	常规导线，性能稳定，大量使用	能耗、线损大，不宜推广应用	虽弧垂特性优，但能耗线损大，价格高昂，应慎重选用	综合性能最优，但价格高昂，技术经济比较后采用	综合性能较优，但价格高昂，除非是特别需要时才采用	能耗、线损低，能提高输送容量，可推广应用	能耗、线损低，增容效果好，价格适宜，可推广应用





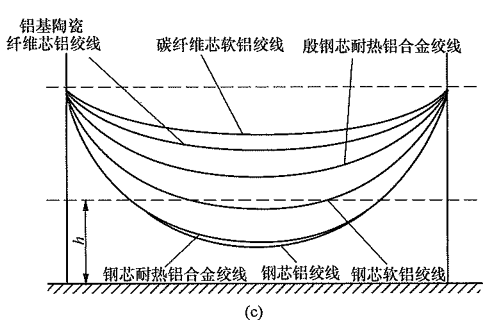


图 5-6 不同导线因温度升高后的弧垂特性状态

（a）40℃时的初始弧垂（安装张力相等）；（b）100℃时的运行弧垂（载流量相当于 70℃时 150%左右）；（c）140～150℃时的运行弧垂（载流量达 200%，*N*–1 状态）

二、单股线的机械特性

各种电线的单股线的机械特性见表 5-12。

表 5-12 单股电线的机械特性

材料＼特性		弹性系数（N/mm²）	线膨胀系数（1/℃）	密度（10^3kg/m³）	抗拉强度（N/mm²）	电阻温度系数（1/℃）	电阻率（Ω·mm²/m）
硬铜线		127000	17×10^{-6}	8.98	400～450	0.00381	0.01777
硬铝线		59000	23×10^{-6}	2.703	159～200	0.00403	0.028264
铝合金线		63000	23×10^{-6}	2.703	290～310	0.0036	0.0328
镀锌钢线		196000	12×10^{-6}	7.8	1175～1570	0.0054	0.195
镀锌殷钢线或铝包殷钢线		152000	3.7×10^{-6}	7.1	1080		
铝基陶瓷纤维线		216500	6.3×10^{-6}	3.33	1275		
碳纤维和玻璃纤维混合线		110300	1.6×10^{-6}	1.9	2414		
软铝线			23×10^{-6}		58.6		0.02737
铝包钢线	JLB14	170000	12×10^{-6}	7.14	1500～1690	0.0034	0.12315
	JLB20（A）	162000	13×10^{-6}	6.59	1100～1340	0.0036	0.0848
	JLB20（B）	155000	12.6×10^{-6}	6.53	1070～1320	0.0036	0.0848
	JLB23	149000	12.9×10^{-6}	6.27	1220	0.0036	0.07496
	JLB27	140000	13.4×10^{-6}	5.91	1080	0.0036	0.06386
	JLB30	132000	13.8×10^{-6}	5.61	800	0.0038	0.05747
	JLB35	122000	14.5×10^{-6}	5.15	810	0.0039	0.04926
	JLB40	109000	15.5×10^{-6}	4.64	680	0.0040	0.04310

GB/T 3953—2009《电工圆铜线》规定了电工圆铜线的型号、规格、材料、尺寸、机械性能、电性能、交货要求及包装等参数。

GB 1179—2017《圆线同心绞架空导线》对圆铝线及镀锌钢芯线的抗拉强度等都有详细规定。

三、组合导线的力学特性

（一）组合导线的弹性系数及温度膨胀系数

输电线路所用导线，多数为两种材质组合而成的组合导线，其导线的力学性能变化与整根组合导线的弹性系数及温度膨胀系数有关。

（1）组合导线的弹性系数（或称弹性模量）E 为单位截面上作用一单位应力时，电线单位长度上所产生的伸长值的倒数（简称弹性伸长系数的倒数）。

为叙述方便起见，以钢芯铝绞线为例予以说明。

钢芯铝绞线弹性系数 E 的大小不仅与铝钢的截面比及两者的单一弹性系数有关，而且与电线的扭绞角度以及在使用中所出现的最大应力等因素有关。工程计算中一般允许不考虑扭绞对应力大小的影响，仅根据钢和铝的伸长相同这一假定，按下式计算。

$$E=\frac{E_s+k_A E_{al}}{1+k_A} \tag{5-12}$$

式中　E_{al}、E_s、E——分别为铝、钢和综合弹性系数，N/mm²；

k_A——铝对钢的截面比，$k_A=\frac{A_{al}}{A_s}$，A_{al}、A_s 分别为铝与钢的截面积。

如果考虑电线的扭绞影响，则所得电线综合弹性系数将较上式为小。

（2）钢芯铝绞线的温度膨胀系数 α，为温度升高1℃时电线单位长度的伸长值。工程计算采用公式同样像上述求弹性系数的假定，按下式计算。

$$a=\frac{a_s E_s+k_A a_{al} E_{al}}{E_s+k_A E_{al}}=\frac{a_s E_s+k_A a_{al} E_{al}}{E\times(1+k_A)} \tag{5-13}$$

式中　a_s、a_{al}——分别为钢和铝的温度膨胀系数，1/℃；

E_{al}、E_s、E、k_A 符号含义同式（5-12）。

钢芯铝绞线的膨胀系数参见附录B。

（二）拐点温度及拐点应力（张力）的计算

由两种材质组成的导线，当二者的温度膨胀系数相差较大时，当导线使用温度较高时，就会出现拐点温度和拐点应力的计算问题。如殷钢芯（或碳纤维芯）铝绞线，由于铝的温度膨胀系数远较殷钢芯（或碳纤维芯）大，当导线温度升高到一定值时，铝部承受应力（张力）就会全部转移到殷钢芯（或碳纤维芯）上，铝部应力变为零，这个一定的温度就称之为拐点温度。当导线温度达到拐点温度以上时，导线的拉力就全部由殷钢芯（或碳纤维芯）承担，相应的，导线弧垂增量就全部取决于殷钢芯（或碳纤维芯）。实际上大量使用的普通钢芯铝绞线也存在拐点温度，但由于其拐点温度较高（一般在110℃左右），而设计允许经常使用的温度在70～90℃，因此，拐点的概念一般并不熟悉，只有在特殊导线（如殷钢芯及碳纤维组合导线）出现后，这一概念才逐渐被了解。

（1）拐点温度 t_d 计算公式

$$t_d=\frac{\sigma_d}{E\times(\alpha_a-\alpha)}+t_0 \tag{5-14}$$

式中　σ_d——导线在拐点温度时的应力，N/mm²；

E——组合导线的综合弹性系数，N/mm²；

α——组合导线的温度膨胀系数，1/℃；

α_a——铝（或铝合金）的温度膨胀系数，1/℃；

t_0——导线的制造温度，一般取+15℃。

（2）拐点应力 σ_d 计算公式

$$\sigma_d^3+\frac{\alpha_a-\alpha}{\alpha_a}\times\left[\frac{\gamma_k^2 l^2 E}{24\sigma_k^2}-\sigma_k-\alpha E(t_k-t_0)\right]\times\sigma_d^2=\frac{El^2\gamma_d^2(\alpha_a-\alpha)}{24\alpha_a} \tag{5-15}$$

式中　σ_k——控制气象条件下的应力，N/mm²；

γ_k——控制气象条件下的比载，N/（m·mm²）；

t_k——控制气象条件下的温度，℃；

l——代表档距，m；

E、α、α_a、t_0 符号意义同式（5-14）。

式（5-15）就是所熟知的状态方程式，且拐点应力与代表档距有关，相应的，拐点温度也和代表档距有关。

由式（5-15）求出拐点应力后，代入式（5-14）即可求出拐点温度。

（三）拐点温度以上导线应力的计算公式

拐点温度以上时，导线的张力全部由承力的芯线承担，这时导线的 E、α 和 A 应全部改为承力芯线的 E_s、α_s 和 A_s，相应的已知条件则为拐点的应力和温度。据此，列出状态方程式如式（5-16）所示。

$$T_e^3-\left[T_d-\frac{m^2l^2E_sA_s}{24T_d^2}-\alpha_sE_sA_s(t_e-t_d)\right]\times T_e^2=\frac{m^2l^2E_sA_s}{24} \tag{5-16}$$

式中　T_e——导线待求的张力，N；

T_d——导线的拐点张力，N；

m——导线质量，kg/m；

l——代表档距，m；

E_s——导线承力芯线的弹性系数，N/mm²；

A_s——导线承力芯线的截面，mm²；

α_s——导线承力芯线的温度膨胀系数，1/℃；

t_e ——导线待求的温度，℃；

t_d ——导线的拐点温度，℃。

（四）钢芯铝绞线的计算拉断力计算

钢芯铝绞线及铝绞线的计算拉断力 T_{ts}，则可按下式计算

$$T_{ts}=\alpha\sigma_{al}A_{al}+\sigma_{1\%}A_s \quad (5\text{-}17)$$

式中 α ——铝线的强度损失系数，37 股及以下的铝绞线取 0.95；37 股以上的铝绞线取 0.9；各种钢芯铝绞线取 1.0；

σ_{al} ——绞前铝线抗拉强度最小值，N/mm²；

A_{al} ——铝线总截面，mm²；

$\sigma_{1\%}$ ——钢线伸长 1%的应力，N/mm²；

A_s ——钢线总截面，mm²。

由于导线上有接续管、耐张管、补修管使导线拉断力降低，故设计使用的导线保证拉断力应为计算额定拉断力的 95%。

关于钢芯铝绞线、铝绞线、铝合金绞线、钢芯铝合金绞线、铝包钢线、铝包钢绞线、钢芯铝包钢绞线、圆铜线、硬铜绞线、铜包钢线、镀锌钢绞线等国家标准和详见附录 B。

四、电线单位荷载及比载

电线每米长度上的荷载简称单位荷载 g（N/m），将其折算到电线单位截面上的荷载称为比载 γ [N/(m·mm²)]。电线上各种单位荷载及比载和计算式列于表 5-13。

表 5-13 电线单位荷载及比载计算表

单位荷载及比载类别	单位荷载（N/m）		比载 [N/（m·mm²）]		说明
	符号	计算公式	符号	计算公式	
自重力荷载	g_1	$g_1=9.80665\times p_1$	γ_1	$\gamma_1=g_1/A$	A—电线截面积，mm²； p_1—电线单位荷载，kg/m； d—电线直径，mm； δ—电线覆冰厚度，mm； v—电线平均高度处的风速，m/s； α—电线风压不均匀系数； $\mu_{\delta c}$—电线体型系数； 表中 9.80665m/s² 为重力加速度取值
冰重力荷载	g_2	$g_2=9.80665\times 0.9\pi\delta(\delta+d)\times 10^{-3}$	γ_2	$\gamma_2=g_2/A$	
自重力加冰重力荷载	g_3	$g_3=g_1+g_2$	γ_3	$\gamma_3=g_3/A$	
无冰时风荷载	g_4	$g_4=0.625v^2 d\alpha\mu_{\delta c}\times 10^{-3}$	γ_4	$\gamma_4=g_4/A$	
覆冰时风荷载	g_5	$g_5=0.625v^2(d+2\delta)\alpha\mu_{\delta c}\times 10^{-3}$	γ_5	$\gamma_5=g_5/A$	
无冰时综合荷载	g_6	$g_6=\sqrt{g_1^2+g_4^2}$	γ_6	$\gamma_6=g_6/A$	
覆冰时综合荷载	g_7	$g_7=\sqrt{g_3^2+g_5^2}$	γ_7	$\gamma_7=g_7/A$	

第三节 电线的应力弧垂计算

一、电线悬挂曲线方程式

在输电线路中，电线是以杆塔为支持物而悬挂起来的。其悬挂曲线形状和表征参数见表 5-14。对于悬挂在两固定点 A、B 的一根柔软的（指不承受弯曲应力）且荷载沿线长均匀分布的线索，当所使用的档距足够大时，电线材料的刚性影响可以忽略，同时电线的荷载系沿线长均匀分布，则电线悬挂形状也可认为是悬链线。有关悬链线特性的公式列于表 5-14 中。从公式中可以看出悬链线方程包含着双曲线函数，计算比较复杂不便使用，故一般将悬链线公式简化为斜抛物线公式。所谓斜抛物线公式是近似的认为电线荷载沿悬挂点连线上均匀分布而简化得来。所谓平抛物线时近似地认为电线荷载沿悬挂点间的水平线上均匀分布而简化得来。另外也可以从悬链线公式的级数展开式中取其主要项直接近似得到斜（平）抛物线公式，其公式相应地列于表 5-14 中。表 5-14 中所列各数据所表示内容如图 5-7 所示。

表 5-14 电线应力弧垂公式一览表

参数 \ 公式类别		悬链线公式	斜抛物线公式	平抛物线公式
曲线方程	坐标 O 点位于电线最低	$y=\dfrac{\sigma_0}{\gamma}\left(\text{ch}\dfrac{\gamma x}{\sigma_0}-1\right)=\dfrac{\gamma x^2}{2\sigma_0}+\dfrac{\gamma^3x^4}{24\sigma_0^3}+\cdots$	$y=\dfrac{\gamma x^2}{2\sigma_0\cos\beta}$	$y=\dfrac{\gamma x^2}{2\sigma_0}$
	坐标 O 点位于电线悬挂点 A	$y'=\dfrac{\sigma_0}{\gamma}\left[\text{ch}\dfrac{\gamma(l_{OA}-x')}{\sigma_0}-\text{ch}\dfrac{\gamma l_{OA}}{\sigma_0}\right]$ 或 $y'=\dfrac{-2\sigma_0}{\gamma}\left[\text{sh}\dfrac{\gamma(2l_{OA}-x')}{2\sigma_0}\text{sh}\dfrac{\gamma x'}{2\sigma_0}\right]$	$y'=x'\tan\beta-\dfrac{\gamma x'(l-x')}{2\sigma_0\cos\beta}$	$y'=x'\tan\beta-\dfrac{\gamma x'(l-x')}{2\sigma_0}$

续表

参数 \ 公式类别		悬链线公式	斜抛物线公式	平抛物线公式
电线弧垂	坐标 O 点位于电线最低点	$f_x = y_A + \tan\beta(l_{OA}+x) - y = \frac{2\sigma_0}{\gamma}\text{sh}\frac{\gamma(l_{OA}+x)}{2\sigma_0}\text{sh}\frac{\gamma(l_{OA}-x)}{2\sigma_0} + \tan\beta(l_{OA}+x)$	$f_x = \frac{\gamma(l_{OA}^2 - x^2)}{2\sigma_0\cos\beta} + \tan\beta(l_{OA}+x)$	$f_x = \frac{\gamma(l_{OA}^2 - x^2)}{2\sigma_0} + \tan\beta(l_{OA}+x)$
	坐标 O 点位于电线悬挂点 A	$f'_x = x'\tan\beta - y' = x'\tan\beta + \frac{2\sigma_0}{\gamma}\left[\text{sh}\frac{\gamma(2l_{OA}-x')}{2\sigma_0}\text{sh}\frac{\gamma x'}{2\sigma_0}\right]$	$f'_x = \frac{\gamma x'(l-x')}{2\sigma_0\cos\beta} = \frac{4x'}{l}\left(1-\frac{x'}{l}\right)f_m$	$f'_x = \frac{\gamma x'(l-x')}{2\sigma_0} = \frac{4x'}{l}\left(1-\frac{x'}{l}\right)f_m$
	最大弧垂	$f_m = \frac{\sigma_0}{\gamma}\left[\text{ch}\left(\frac{\gamma l}{2\sigma_0}\right)\times\sqrt{1+\left(\frac{h}{\frac{2\sigma_0}{\gamma}\text{sh}\frac{\gamma l}{2\sigma_0}}\right)^2} - \sqrt{1+\left(\frac{h}{l}\right)^2} + \frac{h}{l}\times\left(\text{arsh}\frac{h}{l} - \text{arsh}\frac{h}{\frac{2\sigma_0}{\gamma}\text{sh}\frac{\gamma l}{2\sigma_0}}\right)\right]$	$f_m = \frac{\gamma l^2}{8\sigma_0\cos\beta}$ （档距中央）	$f_m = \frac{\gamma l^2}{8\sigma_0}$ （档距中央）
档内线长		$L = \sqrt{\frac{4\sigma_0^2}{\gamma^2}\text{sh}^2\frac{\gamma l}{2\sigma_0} + h^2} = \frac{\sigma_0}{\gamma}\left(\text{sh}\frac{\gamma l_{OA}}{\sigma_0} + \text{sh}\frac{\gamma l_{OB}}{\sigma_0}\right)$	$L = \frac{l}{\cos\beta} + \frac{\gamma^2 l^3\cos\beta}{24\sigma_0^2}$	$L = l + \frac{h^2}{2l} + \frac{\gamma^2 l^3}{24\sigma_0^2}$
悬挂点应力	切线方向综合值	$\sigma_A = \sigma_0\text{ch}\frac{\gamma l_{OA}}{\sigma_0} = \sigma_0 + \gamma y_A = \sigma_0\left[\left(\sqrt{1+\left(\frac{h}{\frac{2\sigma_0}{\gamma}\text{sh}\frac{\gamma l}{2\sigma_0}}\right)^2}\right)\text{ch}\frac{\gamma l}{2\sigma_0} - \frac{\gamma h}{2\sigma_0}\right]$ $\sigma_B = \sigma_0\left[\left(\sqrt{1+\left(\frac{h}{\frac{2\sigma_0}{\gamma}\text{sh}\frac{\gamma l}{2\sigma_0}}\right)^2}\right)\text{ch}\frac{\gamma l}{2\sigma_0} + \frac{\gamma h}{2\sigma_0}\right]$	$\sigma_A = \sqrt{\sigma_0^2 + \frac{\gamma^2 l_{OA}^2}{\cos^2\beta}}$； $\sigma_B = \sqrt{\sigma_0^2 + \frac{\gamma^2 l_{OB}^2}{\cos^2\beta}}$	$\sigma_A = \sigma_0 + \frac{\gamma^2 l_{OA}^2}{2\sigma_0}$； $\sigma_B = \sigma_0 + \frac{\gamma^2 l_{OB}^2}{2\sigma_0}$
	垂直分量	$\sigma_{AV} = \gamma L_{OA} = \sigma_0\text{sh}\frac{\gamma l_{OA}}{\sigma_0}$； $\sigma_{BV} = \gamma L_{OB} = \sigma_0\text{sh}\frac{\gamma l_{OB}}{\sigma_0}$	$\sigma_{AV} = \frac{\gamma}{\cos\beta}l_{OA}$； $\sigma_{BV} = \frac{\gamma}{\cos\beta}l_{OB}$	$\sigma_{AV} = \gamma L_{OA}$； $\sigma_{BV} = \gamma L_{OB}$
电线最低点到悬挂点电线间水平距离		$l_{OA} = \frac{l}{2} - \frac{\sigma_0}{\gamma}\text{arcsh}\frac{\gamma h}{2\sigma_0\text{sh}\frac{\gamma l}{2\sigma_0}}$； $l_{OB} = \frac{l}{2} + \frac{\sigma_0}{\gamma}\text{arcsh}\frac{\gamma h}{2\sigma_0\text{sh}\frac{\gamma l}{2\sigma_0}}$	$l_{OA} = \frac{l}{2} - \frac{\sigma_0}{\gamma}\sin\beta$； $l_{OB} = \frac{l}{2} + \frac{\sigma_0}{\gamma}\sin\beta$	$l_{OA} = \frac{l}{2} - \frac{\sigma_0}{\gamma}\tan\beta$； $l_{OB} = \frac{l}{2} + \frac{\sigma_0}{\gamma}\tan\beta$
电线悬挂点到电线最低点间垂直距离		$y_A = \frac{\sigma_0}{\gamma}\left(\text{ch}\frac{\gamma l_{OA}}{\sigma_0} - 1\right)$； $y_B = \frac{\sigma_0}{\gamma}\left(\text{ch}\frac{\gamma l_{OB}}{\sigma_0} - 1\right)$	$y_{OA} = \frac{\gamma l_{OA}^2}{2\sigma_0\cos\beta} = f_m\left(1 - \frac{h}{4f_m}\right)^2$ $y_{OB} = \frac{\gamma l_{OB}^2}{2\sigma_0\cos\beta} = f_m\left(1 + \frac{h}{4f_m}\right)^2$	$y_{OA} = \frac{\gamma l_{OA}^2}{2\sigma_0} = f_m\left(1 - \frac{h}{4f_m}\right)^2$ $y_{OB} = \frac{\gamma l_{OB}^2}{2\sigma_0} = f_m\left(1 + \frac{h}{4f_m}\right)^2$

续表

参数＼公式类别	悬链线公式	斜抛物线公式	平抛物线公式
电线悬挂点电线悬挂角（倾斜角）	$\theta_A=\operatorname{arctan} \operatorname{sh}\dfrac{\gamma l_{OA}}{\sigma_0}$； $\theta_B=\operatorname{arctan} \operatorname{sh}\dfrac{\gamma l_{OB}}{\sigma_0}$	$\theta_A=\arctan\left(\dfrac{\gamma l}{2\sigma_0\cos\beta}-\dfrac{h}{l}\right)$； $\theta_B=\arctan\left(\dfrac{\gamma l}{2\sigma_0\cos\beta}+\dfrac{h}{l}\right)$	$\theta_A=\arctan\left(\dfrac{\gamma l}{2\sigma_0}-\dfrac{h}{l}\right)$； $\theta_B=\arctan\left(\dfrac{\gamma l}{2\sigma_0}+\dfrac{h}{l}\right)$

注 $\operatorname{sh}x=\dfrac{e^x-e^{-x}}{2}=x+\dfrac{x^3}{3!}+\dfrac{x^5}{5!}+\dfrac{x^7}{7!}+\cdots$，双曲正弦函数；

$\operatorname{ch}x=\dfrac{e^x+e^{-x}}{2}=1+\dfrac{x^2}{2!}+\dfrac{x^4}{4!}+\dfrac{x^6}{6!}+\cdots$，双曲余弦函数；

l——档距（两悬挂点之间水平距离），m；

h——高差（两悬挂点之间垂直距离），m；

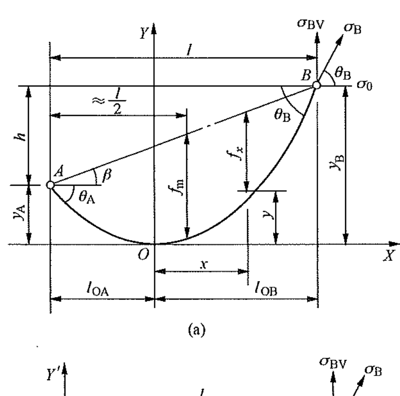
β——高差角，$\tan\beta=\dfrac{h}{l}$；

f——电线弧垂（两悬挂点连线上各点到电线上的垂直距离），m；

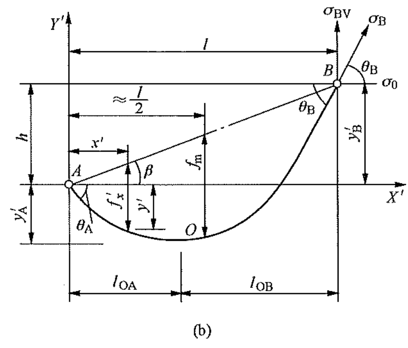
y、y'——电线各点到横坐标轴的垂直高度，m；

σ_0——电线各点的水平应力（亦即最低点之应力），N/mm²；

γ——电线比载（即单位长度单位截面上的荷载），N/（m·mm²）。



(a)



(b)

图 5-7 电线应力弧垂参数示意图

（a）坐标 O 点位于电线最低点；

（b）坐标 O 点位于电线悬挂点 A

二、弧垂公式的选用

弧垂误差比较，若以悬链线弧垂公式作为标准公式，则在同样条件下（即 l，γ，σ，h 相同），抛物线公式算得的弧垂偏小，且随着 $\dfrac{\gamma l}{\sigma_0}$ 的增加而误差增大。

弧垂公式直接影响电线使用应力的误差和电线对跨越物的间距误差。由于悬链线弧垂公式计算复杂，故一般工程设计与施工常采用平抛物线公式，即电线偏于拉紧，使应力偏大。线路在一般使用档距和应力下，$\dfrac{f_m}{l}=\dfrac{\gamma l}{\delta\sigma_0}$ 约在 0.1 以下，弧垂减小值不超过 2%，也可近似地认为应力增大值不超过 2.0%。由于电线使用应力地安全系数较大，而且应力的增量同施工测量误差，悬挂点应力增量，振动附加应力，接头强度降低等因素比较并不显著是可容许的。然而在实际架线中往往并不能保证均以平抛物线的小弧垂架线，如连续档中有悬挂点等高档和不等高档，若在等高档观测弧垂，而不等高档内的弧垂必然要大于平抛物线计算值。因此，对于大档距和大高差的档距，在杆塔定位与施工架线中，要采取措施避免对地或跨越物引起间距不足（如定位是留出裕度）。因为对大档距大高差的档距不仅弧垂误差的百分数大，且其绝对值往往大到不能容许的程度（如弧垂时 100m，误差 2%就是 2m）。

在一般情况下，当 $\dfrac{h}{l}>0.15$ 时，应用斜抛物线公式计算和架设弧垂，斜抛物线公式是比较精确的，且随着 $\dfrac{h}{l}$ 增大反而误差更小。然而斜抛物线无法刻制通用的弧垂曲线定位模板，可用悬链线弧垂模板定位，按不同条件用平抛物线或斜抛物线弧垂设计与架设。这样对间距、应力计算等均有照顾。

三、电线的状态方程式

悬挂于两固定点的电线，当气象条件变化时（即

气温及荷载改变时），电线应力及弧垂也随着发生变化。当已知某一气象条件下的电线应力 σ_m、比载 γ_m、气温 t_m 及待求应力气象条件下的 γ、t 时，考虑电线的弹性伸长及温度伸长并利用两种气象状态下档内原始线长（制造长度即不受拉力的长度）不变的原则，便可列出电线的状态方程，求出待求气象条件下的电线应力。

（一）常用的电线状态方程式及解法

按悬挂点等高的情况求得

$$\sigma_m - \frac{\gamma_m^2 l^2 E}{24\sigma_m^2} = \sigma - \frac{\gamma^2 l^2 E}{24\sigma^2} - aE(t_m - t) \qquad (5\text{-}18)$$

令

$$\frac{l^2\gamma_m^2 E}{24\sigma_m^2} - \sigma_m + \alpha E(t - t_m) = k_m + \alpha E t = a$$

$$\frac{\gamma^2 l^2 E}{24} = b$$

$$k_m = \frac{l^2\gamma_m^2 E}{24\sigma_m^2} - (\sigma_m + \alpha E t_m)$$

则式（5-18）可简化为

$$\sigma^2(\sigma + a) = b \qquad (5\text{-}19)$$

式中 σ_m、σ——分别为已知情况和待求情况下的电线最低点的水平应力，N/mm²；

γ_m、γ——分别为已知情况和待求情况下的电线比载，N/（m·mm²）；

l——电线档距，对具有悬垂绝缘子串的直线杆塔的连续档，则为耐张段的代表档距 l_r，见式（5-21）；

E——电线的弹性系数，N/mm²；

α——电线的膨胀系数，1/℃；

k_m——已知条件系数。

式（5-19）为三次方程，其简化求解方法如下。

式（5-19）状态方程式中，b 值永远为正，而 a 值可正可负，为便于讨论，将 a 值的正负号分出来，即化为 $\sigma^2(\sigma + CA) = b$

式中，$A = |a|$；$C = \frac{a}{|a|} = \pm 1$ 与 a 的正负号相同。

设状态方程式的判别式为：$\varDelta = 13.5 \times \frac{b}{A^3} - C$

则当 $\varDelta \geqslant 1$ 时，设 $\theta = \mathrm{arcch}\varDelta$，可解得

$$\sigma = \frac{A}{3}\left(2\mathrm{ch}\frac{\theta}{3} - c\right)$$

当 $\varDelta \leqslant 1$ 时，设 $\theta = \arccos\varDelta$，可解得

$$\sigma = \frac{A}{3}\left(2\cos\frac{\theta}{3} - c\right)$$

当 A=0 时，则得：$\sigma = \sqrt[3]{b}$

如计算器带有微型程序功能，则可用公式，$\sigma_{i-1} = \sqrt{\frac{b}{\sigma_i + a}}$，（其中 σ_i，当 i=1 时的应力值可由经验确定）求解较为方便。

（二）悬挂点不等高的电线状态方程式

按斜抛物线线长公式导出，如式（5-20），它的精度很接近悬链线方程。对于具有高差的重要跨越档或高差很大的档距，为使其应力或弧垂的计算误差不致超出允许范围，应考虑采用式（5-20）计算应力变化或进行校验计算。

$$\sigma_m - \frac{\gamma_m^2 l^2 E\cos^3\beta}{24\sigma_m^2} = \sigma - \frac{\gamma^2 l^2 E\cos^3\beta}{24\sigma^2} - \alpha E\cos\beta(t_m - t) \qquad (5\text{-}20)$$

式中：β 对于孤立档为悬挂点高差角；对于具有悬垂绝缘子串的连续档；l 应为不等高代表档距 l_r；β 应为代表高差角 β_r。l_r、β_r 见式（5-22）、式（5-23）。

四、连续档的代表档距及档距中央应力状态方程

对于耐张段间（两基相邻的耐张杆塔间）具有若干悬挂悬垂绝缘子串的直线杆塔的连续档中，各档电线水平应力 σ_0 是按同一值架设的。但当气象条件变化时，由于各档的档距线长及高差不一定相同，各档应力变化就不完全相同，从而使直线杆塔上出现不平衡张力差，使悬垂绝缘子串产生偏斜。偏斜结果则又使各档应力趋于基本相同的某一数值上。这个应力可称为耐张段内的代表应力，其值是用耐张段内的所谓代表档距带入电线状态方程式中求出的。

（1）常用的代表档距，系不考虑悬挂点有高差的情况得出其计算式为

$$l_r = \sqrt{\frac{l_1^3 + l_2^3 + l_3^3 + \cdots + l_n^3}{l_1 + l_2 + l_3 + \cdots + l_n}} = \sqrt{\frac{\sum l^3}{\sum l}} \qquad (5\text{-}21)$$

式中 l_r——代表档距，m；

$l_1, l_2, l_3, \cdots, l_n$——耐张段内各档的档距，m。

（2）考虑高差影响的代表档距 l_r 与代表高差角 β_r，是与考虑高差影响的电线状态方程式（5-20）相配合，其计算式为

$$l_r = \frac{1}{\cos\beta_r} \times \left(\frac{l_1^3\cos\beta_1 + l_2^3\cos\beta_2 + \cdots + l_n^3\cos\beta_n}{\frac{l_1}{\cos\beta_1} + \frac{l_2}{\cos\beta_2} + \cdots + \frac{l_n}{\cos\beta_n}}\right)^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{\cos\beta_r} \times \left(\frac{\sum l^3\cos\beta}{\sum\frac{l}{\cos\beta}}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (5\text{-}22)$$

$$\cos\beta_r=\frac{\dfrac{l_1}{\cos\beta_1}+\dfrac{l_2}{\cos\beta_2}+\cdots+\dfrac{l_n}{\cos\beta_n}}{\dfrac{l_1}{\cos^2\beta_1}+\dfrac{l_2}{\cos^2\beta_2}+\cdots+\dfrac{l_n}{\cos^2\beta_n}}=\frac{\sum\dfrac{l}{\cos\beta}}{\sum\dfrac{l}{\cos^2\beta}} \tag{5-23}$$

式（5-22）、式（5-23）中l_1，l_2，…，l_n及β_1，β_2，…，β_n分别为耐张段内各档距及高差角。

考虑高差影响代表档距的公式为近似式，由于近似方程式不同，式（5-22）、式（5-23）有不同形式，但结果相差甚少，皆可采用。

工程设计中一般均按悬挂点等高情况的式（5-18）计算应力变化曲线，因此，即使对山区不等高连续档也不按式（5-20）～式（5-23）的方法计算，致使这些地段的应力弧垂计算产生较大的误差。为使悬挂点不等高档与等高档的应力计算状态方程统一起来，下面介绍一种档距中央应力计算的通用状态方程式。

（3）档距中央应力状态方程式。

1）档距中央应力的状态方程式。当悬挂点不等高时，用档距中央的应力$\sigma_c=\dfrac{\sigma}{\cos\beta}$代入式（5-20），可将不等高状态方程式为

$$\sigma_{cm}-\frac{E\gamma_m^2l^2}{24\sigma_{cm}^2}=\sigma_c-\frac{\gamma^2l^2E}{24\sigma_c^2}-\alpha E(t_m-t) \tag{5-24}$$

$$\sigma_{cm}=\frac{\sigma_m}{\cos\beta}$$

$$\sigma_c=\frac{\sigma}{\cos\beta}$$

式中 σ_{cm}、σ_c——分别为档距中央的已知情况和待求情况的应力，N/mm²；

β——悬挂点间的高差角，（°）。

其余符号含义同式（5-18）。

当计算不等高的连续档应力时，式中的l和β用式（5-22）和式（5-23）中的l_r及β_r代替。

式（5-24）的形式与悬挂点等高的式（5-18）是一样的，对悬挂等高档的应力计算也同样适用（因$\cos\beta=1$），此时，σ_{cm}、σ_c即电线最低点档距中央的水平应力。

2）不等高档内的电线弧垂。不等高档中央的弧垂按式（5-25）计算，它比传统计算法的弧垂增大$1/\cos\beta_r$倍。

$$f\approx\frac{\sigma_c\cos\beta_r}{\gamma\cos\beta}\times\left(\mathrm{ch}\frac{\gamma l}{2\sigma_c\cos\beta_r}-1\right)\approx\frac{\gamma l^2}{8\sigma_c\cos\beta_r\cos\beta} \tag{5-25}$$

式中 f——计算弧垂档的档中央最大弧垂，m；

σ_c——耐张段内代表档距l_r中央的应力，N/mm²；

β_r——耐张段内代表档距l_r的代表高差角，（°）；

β——计算弧垂档的高差角，（°）；

l——计算弧垂档的档距，m。

五、水平、垂直档距

（一）水平档距

当计算杆塔结构所承受的电线横向（风）荷载时，其荷载通常近似认为是电线单位长度上的风压与杆塔两侧档距平均值之乘积，这个档距平均值称为水平档距，即

$$l_H=(l_1+l_2)/2 \tag{5-26}$$

在高差较大且又需要准确地计算杆塔的水平荷载时，其水平档距可按下式计算

$$l_H=\frac{\left(\dfrac{l_1}{\cos\beta_1}+\dfrac{l_2}{\cos\beta_2}\right)}{2} \tag{5-27}$$

式中 l_H——水平档距，m；

l_1、l_2——分别为杆塔两侧的档距，m；

β_1、β_2——分别为杆塔两侧高差角，（°）。

（二）垂直档距

当计算杆塔结构所承受的电线垂直荷载时，其荷载通常近似的认为是电线单位长度上的垂直荷载与杆塔两侧电线最低点（0 点）间的水平距离之乘积，此距离因系供计算垂直荷载之用故称为垂直档距，常用计算式为

$$l_v=l_{1v}+l_{2v}=\left(\frac{l_1}{2}+\frac{\sigma_{10}h_1}{\gamma_v l_1}\right)+\left(\frac{l_2}{2}+\frac{\sigma_{20}h_2}{\gamma_v l_2}\right) \tag{5-28}$$

当直线杆塔$\sigma_{10}=\sigma_{20}=\sigma_0$时

$$l_v=\frac{l_1+l_2}{2}+\frac{\sigma_0}{\gamma_v}\left(\frac{h_1}{l_1}+\frac{h_2}{l_2}\right)=l_H+\frac{\sigma_0}{\gamma_v}a \tag{5-29}$$

式中 l_{1v}、l_{2v}——分别为某一杆塔两侧的垂直档距，m；

σ_{10}、σ_{20}——分别为某一杆塔两侧的电线水平应力，N/mm²；

a——杆塔的综合高差系数；

l_1、l_2、l_H——分别为杆塔两侧的档距和杆塔的水平档距，m；

h_1、h_2——分别为杆塔两侧的悬挂点高差，m，当邻塔悬挂点低时取正号，反之取负号；

σ_0——耐张段内的电线水平应力，N/mm²，对于耐张塔，应取两侧可能不同的应力，按对应注角号分开计算垂直档距；

γ_v——电线的垂直比载，N/（m·mm²）；

$\beta_1=\arctan\dfrac{h_1}{l_1}$，$\beta_2=\arctan\dfrac{h_2}{l_2}$分别为杆塔两侧高差角，（°）。

当高差很大，需要较精确的计算塔所承受的垂直荷载时，其垂直荷载可按电线单位荷载分别增大 $\sec\beta_1$、$\sec\beta_2$ 倍，再分别与 l_{1v}、l_{2v} 相乘之和计算。

六、极大档距、极限档距和允许档距

（一）极大档距

线路设计中为方便起见，一般均以导线在弧垂最低点的应力作为计算的基点。架空输电线路设计规范中也规定了导、地线在弧垂最低点的设计安全系数不应小于 2.5，但实际上导线其他各点应力都比最低点应力大。因此设计规范中规定：悬挂点的设计安全系数不应小于 2.25。如导线悬挂点比最低点高得很多时，还应验算悬挂点的导线应力。

在线路设计中的一般档距上，导线在最低点的安全系数为 2.5 时，皆能保持悬挂点安全系数大于 2.25。如果某档距两端导线悬挂点高差为零（h=0）且导线悬挂点安全系数刚刚达到 2.25 时，则称此档距为极大档距。有高差时极大档距皆较此值小。

在上述条件下，当 h=0 时，极大档距的最大值按下式计算

$$l_{0m}=\frac{2\sigma_m}{\gamma_7}\operatorname{arch}\frac{2.5}{2.25}=0.9342906\frac{\sigma_m}{\gamma_7} \tag{5-30}$$

当 $h\neq0$ 时，极大档距 l_m 与高差 h 的关系式为

$$h=\left(\frac{2\sigma_m}{\gamma_7}\operatorname{sh}\frac{\gamma_7 l_m}{2\sigma_m}\right)\operatorname{sh}\left(\operatorname{arch}\frac{2.50}{2.25}-\frac{\gamma_7 l_m}{2\sigma_m}\right) \tag{5-31}$$

式中 l_m——极大档距，m；

h——极大档距悬挂点间的高差，m；

σ_m——导线最低点允许最大应力，N/mm²；

γ_7——导线覆冰时综合比载（取最大比载，如大风控制，则取 γ_6），N/（m·mm²）。

式(5-31)的 h、l_m 的临界关系绘于图 5-8 中 $\mu=1$ 的曲线上。

（二）极限档距和允许档距

如果线路上的档距超过相应高差时的极大档距，则必须放松导线应力才能符合规程要求。此时悬挂点的安全系数保持 2.25，而弧垂最低点的安全系数为 2.5 除以放松系数μ。这种条件下的档距称μ为某值时的允许档距。

μ 愈小允许档距愈大。但是，当导线应力放松到一定数值后，如果再继续放松，这时导线的荷载因弧垂的增大而迅速增大，对导线悬挂点应力起主要作用，允许档距反而会减小。故 μ 小到某一极限最小值所能得到的最大允许档距称为极限档距 l_l。因此极限档距和极大档距为允许档距数值的上下包络线。当 h=0 时极限档距 $l_{l0}=1.473\times\dfrac{\sigma_m}{\gamma_7}$，此时放松系数极限最小值 $\mu_l=0.614$，导线最低点应力应放松为 $0.614\sigma_m$。

（三）放松系数

当导线放松，悬挂点的应力大于最低点应力的 1.11 倍时，允许档距与放松系数的关系如下式

$$\frac{h}{l}=\frac{\operatorname{sh}(C_o/\mu)}{C_o/\mu}\operatorname{sh}\left(\operatorname{arch}\frac{1.11}{\mu}-\frac{C_o}{\mu}\right) \tag{5-32}$$

$$\mu=\sigma'/\sigma_m$$

式中 h——档距两端悬挂点高差，m；

l——允许档距，m；

μ——放松系数；

C_o——通式为 $C_o=\dfrac{\gamma l}{2\sigma_m}$（其中 γ，当覆冰控制时取 γ_7，$\gamma_6>\gamma_7$ 时取 γ_6）；

σ_m——导线最低点允许最大应力，N/mm²；

σ'——导线放松后最低点最大使用应力，N/mm²；

γ_6——导线无冰时综合比载；

γ_7——导线覆冰时综合比载。

上式中未知数 μ 分散在好几项中，故不易求得。将上式绘成一组曲线，则很容易从图中根据 C_o 和 h/l 查出 μ 值。此图称为导线应力放松图，如图 5-8 所示。

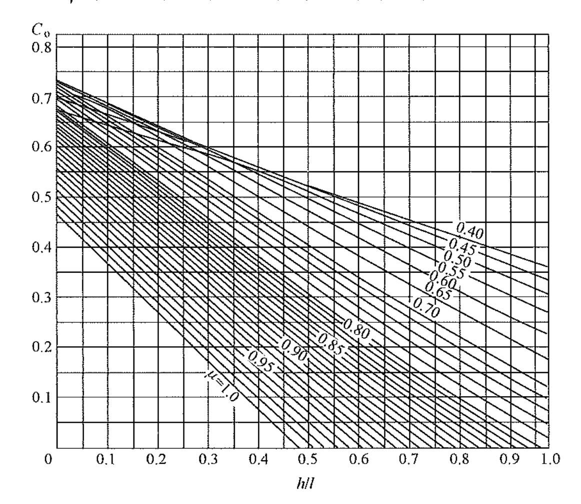


图 5-8　导线应力放松图

【例 5-1】设定某导线 JL/G1A-300/40 的 $\sigma_m=100\text{N/mm}^2$，覆冰 10mm、风速为 10m/s 时，$\gamma_7=6.253\times10^{-2}$N/（m·mm²），试求该导线应力放松系数。

解　由 $\sigma_m/\gamma_7=1599.23$ 可得 $h=0$ 时的极大档距值为 $l_{om}=1418.7\text{m}$。

如档距为 1400m，高差为 420m，则得 $h/l=0.3$，$C_o=\dfrac{1400}{2\times1599.23}=0.4377$。

依此，从图 5-8 上可求出应力放松系数为 $\mu=0.8$。即覆冰时导线最低点的最大使用应力应放松为 $\sigma_m=0.8\times100=80\text{N/mm}^2$，才能保证悬挂点处的应力

恰好在允许范围。

又如档距为 1000m，高差为 125m，则得 $h/l=0.125$，$C_o=\dfrac{1000}{2\times1599.23}=0.313$ 此两数在图 5-8 中交与 $\mu=1$ 的曲线上，表明悬挂点安全系数不低于 2.25。此档距即为 $h=125$m 时的极大档距。又如，某 h/l 曲线的下方，则表明尚未达到极大档距，即悬点应力未到最大允许值。

七、电线应力弧垂曲线计算

在线路设计中，为全面了解电线在各种气象条件下运行时的力学特性，便于在设计中查用有关数据，需将各个代表档距（或孤立档距）下各种气象条件时的电线应力及有关弧垂计算出来，绘成随代表档距变化的弧垂应力曲线。计算曲线前必须预先确定各种气象条件，计算电线在各种气象条件下的比载，确定电线使用安全系数和最大使用应力及有关气象条件下的控制应力（如平均运行应力值，地线受导线与地线间距控制的应力等），计算临界档距，划定各种控制应力出现的档距区间，确定各区间内的已知应力及相应的气象条件，然后才能计算其他气象条件下的应力及弧垂。

（一）控制应力的选定

1. 电线最大使用应力的选定

电线发生最大应力时（如最大风，冰荷载或最低气温时），应具有一定的安全系数。以安全系数 k_s 除以电线的破坏强度 σ_{ts}（或抗拉强度），即得电线最大的使用应力（指电线最低点的水平应力），以式（5-33）表示

$$\sigma_m=\frac{\sigma_{ts}}{k_s} \tag{5-33}$$

式中 σ_m ——最大使用应力，N/mm²；

σ_{ts} ——电线的破坏强度，N/mm²；

k_s ——电线的安全系数。

设计规范规定，电线的安全系数不应小于 2.5，地线的安全系数宜大于导线的安全系数。导线、地线在稀有风速或覆冰气象条件时，弧垂最低点的最大张力，均应按不超过拉断力的 70%（特高压线路为 60%）；悬挂点不超 77%（特高压线路为 66%）。

如悬挂点高差过大，正常情况应验算悬挂点安全系数。悬挂点安全系数不应小于 2.25。

架设在滑轮上的导线或地线，应计算悬挂点局部弯曲引起的附加应力。

2. 平均运行应力的限制

为了防止电线振动的危害，就需要对电线的平均运行应力有一个限制。设计规范规定：当有防振措施的情况下，导线及地线的平均运行应力不得超过额定拉断应力的 25%。其原因详见本章第六节。

3. 地线截面与使用应力的选定

（1）按线路设计规范规定，地线与导线之截面配合，当地线采用镀锌钢绞线时应符合表 5-15 的规定。

表 5-15 地线采用镀锌钢绞线时与导线配合表

导线型号		JL/G1A-185/30 及以下	JL/G1A-185/45～JL/G1A-400/35	JL/G1A-400/50 及以上
镀锌钢绞线最小标称截面积（mm²）	无冰区段	35	50	80
	覆冰区段	50	80	100

注 500kV 及以上输电线路无冰区段、覆冰区段地线采用镀锌钢绞线时最小标称截面积应分别不小于 80、100mm²。

（2）根据 GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》及 GB 50545—2010《110kV～750kV 架空输电线路设计规范》的防雷要求，在大气过电压气象条件时（+15℃、无风、无冰），一般档距导线与地线在档距中央应保持 $0.012l+1$m 或 $0.015l+1$m 的间距，此处 l 为档距，但这个距离要求各规范有所不同，设计时可根据工程的具体情况合理选用。设计时须按此要求选定地线与+15℃时各代表档距下的应力，并以此应力作为已知有效控制条件，再用状态方程式求出其最大使用应力，平均运行应力及其他条件下的应力。若求出的最大使用应力与平均运行应力超出或过低于规定数值，可在杆塔地线保护角满足要求的情况下，适当放大或缩小导线与地线悬挂点间的距离，使之较均衡地满足各控制条件。

一般地线弧垂应小于导线弧垂。对重冰区尚应检查导线不同期脱冰时，地线不应垂于导线下方。

根据间距要求，地线在+15℃、无风、无冰时的应力 σ_g 可由下式算出。

$$\sigma_g=\frac{\gamma_g}{\dfrac{\gamma_c}{\sigma_c}-\dfrac{8\left[\sqrt{(k_v l_x+A)^2-s^2}-h\right]}{l_x^2}} \tag{5-34}$$

式中 γ_c、γ_g ——导线和地线的自重力比载，N/(m·mm²)；

σ_c、σ_g ——导线和地线在某代表档距下，+15℃、无风、无冰时的应力，N/mm²；

k_v ——与电压等级相关的系数，取 0.012 或取 0.015；

A——导地线间距离增加值，m，交流线路一般取 1，1000kV 线路可根据情况结合有关科研成果确定，直流线路取 1.5；

l_x——可能在工程中出现的档距范围内，使地线应力 σ_g 为最大值的档距，m；

s、h——导线和地线在杆塔上悬挂点间的水平间距和垂直间距，m。

l_x 一般用控制档距 l_c 代入，控制档距由式（5-35）求得

$$\left.\begin{aligned} h &= \frac{(k_v l_c)^2 + 3k_v A l_c - 2(s^2 - A^2)}{2\sqrt{(k_v l_c + A)^2 - s^2}} \\ \text{当} s = 0 \text{时} \quad l_c &= \frac{2(h-A)}{k_v} \end{aligned}\right\} \tag{5-35}$$

如已知 h、s 可求解式（5-35）中的 l_c。为简化计算，绘制了控制导地线间距离为（$0.012l+1$）时 l_c 计算曲线见图 5-9，按图可查出 l_c 值。

控制档距 l_c 的意义是：当以 l_c 值代替 l_x 值代入式(5-34)中，求得在某代表档距下的地线控制应力 σ_g 时，则档距长度为 l_c 一档的导线与地线在档距中央的间距，恰好满足（$k_v l_x + A$）的要求。而长度大于或小于 l_c 的档距中，导线和地线之间距均有富裕。

当工程中的最大档距 l_{max} 小于 l_c 时，为了力争降低地线应力，避免将地线拉得过紧，也可取 $l_x = l_{max}$。此时最大档距及其以下档距中，导线和地线之间距均能满足设计规范要求。

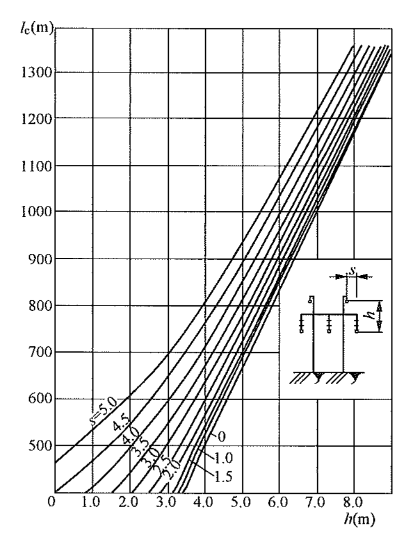


图 5-9　计算地线应力 σ_g（+15℃）的控制档距 l_c 的求解曲线

当可能出现的最小档距 l_{min} 明显大于 l_c 时，同样为了降低地线应力，可取 $l_x = l_{min}$。此时大于及等于 l_{min} 的档距，间距均能满足要求。

由于计算应力时，事先不易准确估计各耐张段内的档距长度范围及杆塔类型，因此一般多以 $l_x = l_c$ 进行 σ_g 计算。待施工图设计阶段，再根据具体的耐张段内的档距大小范围，考虑是否可以按后两种情况，放松地线应力。

为使地线弧垂小于导线弧垂，式（5-34）中 $\dfrac{8\left[\sqrt{(k_v l_c + A)^2 - s^2} - h\right]}{l_c^2}$ 应为正值。

（二）临界档距及其选定

电线上的应力随着气象情况而变化。如果对某一种气象情况，制定其应力不得超过某一数值，则该情况就成为设计中的一个控制条件。例如，最大使用应力和平均运行应力，其相应的气象条件为最大荷载（风、冰）、最低气温及平均气温。因此这些气象情况就成为几个不同的控制条件，在各代表档距下，电线应力均不应超出各控制条件。各控制条件可能只有部分条件（称有效控制条件）在不同的档距范围内起控制作用。而在某一档距下可能某两个有效控制条件同时起控制作用，超过此档距时是一个条件控制，而小于此档距时则是另一个条件控制。这样的档距称为两个有效控制条件的有效临界档距。所以在设计中确定了最大使用应力和平均运行应力的数值后，还必须根据指定的可能控制条件算出互相组合的临界档距，并判定出有效临界档距，划分出各有效控制条件起控制作用的档距范围，然后才能计算其他气象情况下的应力和弧垂。这样算得应力值才能保证在任何档距下均不超过所选定的最大使用应力或平均运行应力。

临界档距可用下式计算

$$l_{cr} = \sqrt{\frac{\dfrac{24}{E}(\sigma_m - \sigma_n) + 24\alpha(t_m - t_n)}{\left(\dfrac{\gamma_m}{\sigma_m}\right)^2 - \left(\dfrac{\gamma_n}{\sigma_n}\right)^2}} \tag{5-36}$$

式中　l_{cr}——临界档距，m；

σ_m、σ_n——分别为 m、n 两种控制条件下允许的使用应力，N/mm²；

t_m、t_n——分别为两种控制条件下的气温，℃；

γ_m、γ_n——分别为两种控制条件下的导线比载，N/（m·mm²）；

α——导线的温度膨胀系数，1/℃；

E——导线的弹性系数，N/mm²。

若两控制条件下的电线允许应力值相等（$\sigma_m = \sigma_n$）时，则临界档距 l_{cr} 的计算公式为

$$l_{cr} = \sigma_m \sqrt{\frac{24\alpha(t_m - t_n)}{\gamma_m^2 - \gamma_n^2}} \tag{5-37}$$

如上所述，既然每两个控制条件便可得到一个临界档距，如有最大风、冰、最低气温及平均气温四个

控制条件，两两组合即可得到 6 个临界档距。但是真正有意义的临界档距最多不超过 3 个，最少为 0（按每一条件控制一段档距，可有三个分界线，如只有两个条件起控制作用，则只有一个分界线）。相邻有效控制条件间的临界档距称之为有效临界档距。设计时首先算出可能起控制作用的各控制条件互相组合的临界档距（如四个可能控制条件，可两两组合为 6 个），然后按一定规律判别出有效临界档距和有效控制条件。判别的步骤如下。

（1）假如有四种可能的控制条件，则按照各自的 γ/σ 的大小，由小到大分别以 A、B、C、D 表示。在一般情况下，最低气温条件为 A，平均气温条件为 B，最大风和覆冰条件为 C、D。如果其中有两种条件的 γ/σ 相同，则须另计算这两种条件的 $\sigma+aEt$ 值取其较小者编入顺序，较大者不参与判别，因为肯定不起控制作用。然后按式（5-36）或式（5-37）以两两组合原则算出 6 个临界档距。

（2）将算得的 l_{cr} 按 A、B、C 三种控制条件，各与其他控制条件组合顺序排成的数列见表 5-16。

表 5-16　控制条件顺序表

A	B	C	D
l_{crAB}	l_{crBC}	l_{crCD}	
l_{crAC}	l_{crBD}		
l_{crAD}			

（3）先从 γ/σ 值最小的 A 栏内开始判别，取该栏中最小的一个临界档距（不是虚数或 0），如果档距为正实数，则此档距即为第一个有效临界档距（如 l_{crAB}）。于是在 A 栏内凡与 A 情况组合的其他临界档距（如 l_{crAC}、l_{crAD}）即应舍去。该有效临界档距为 A 情况控制的档距上限，并成为该有效临界档距后一个注脚所代表的控制档距下限（如 l_{crAB} 中的 B 情况），A、B 此时为有效控制条件。

紧接着对第一个有效临界档距后一个注脚所代表的情况栏进行判别（如 B 或 C 情况栏）。依上述选择原则，选出第二个有效临界档距（如 l_{crBC}）。如第一有效临界档距为 l_{crAC}，则 B 被隔越，B 栏则全被舍去（即 B 为无效控制条件）。

根据上述原则，依此类推判别到最后一栏（如 C 栏）。

不论在哪一栏内，如果其中有一个临界档距值为虚数或 0 时，则该栏所有档距均舍去（即该栏内无有效临界档距），表示该栏条件不起控制作用（即无效控制条件）。

如果平均运行应力取值甚低，或覆冰相对甚薄且最低气温较高，那么平均气温条件下的 γ/σ 可能为最大，因而该控制条件将排到 D 栏。此时可能出现其他各栏中皆有一个临界档距为虚数或 0，故 A、B、C 各栏均应舍去，只剩下 D 栏。因此当 A、B、C 各栏均出现虚数时，该电线将无有效临界档距，且全部为 D 条件即平均气温条件控制（为唯一的有效控制条件）。

（4）对于地线，如果是先按式（5-34）求得 σ_g，然后推求各种气象情况下的应力时，则其临界档距值与导线一致。否则也要按上述步骤确定其自己的有效临界档距。

（5）利用判别式判断有效控制条件控制的档距区间和有效临界档距。将式（5-18）求解应力状态方程中的已知条件系数 k_m 写成式（5-38）的判别式

$$k_{mx}=\frac{E\gamma_{mx}^2 l^2}{24\sigma_{mx}^2}-(\sigma_{mx}+aEt_{mx}) \tag{5-38}$$

式中符号含义与式（5-18）相同，脚注多加一个 x 表示已知的各种控制条件。令 l 为参变数（如在电脑计算中设 $l=0,1,2,3,\cdots,l_{max}$）并将所有已知控制条件下的 γ_m、σ_m、t_m 分别代入式（5-38）求得某一个 l 下的所有 k_{mx}，其中最大者即为该档距的有效控制条件（其余已知控制条件在该档距下不起控制）。改变 l 便可判断出所有使用档距（或代表档距）范围内的有效控制条件。当 l 和 $l+1$ 的有效控制条件不同时，再细分其间的档距值（如 $l+0.1$，$l+0.2$，…，$l+0.9$）并分别代入该档距范围内两个不同的有效控制条件，找出某一个 l_x 下两有效控制条件 k_{mx} 相同时，此档距即为两有效控制条件的有效临界档距 l_{cr}。也可将两相临有效控制条件的参数 γ、σ、t 代入式（5-36）中解出有效临界档距 l_{cr}。由于电算的速度很快，用判别式逐档寻找有效控制条件和有效临界档距变得非常容易。

（三）最大弧垂判别法

为计算电线对地或其他跨越物间距，往往需要知道电线可能发生的最大垂直弧垂。最大弧垂可能发生在最高气温时或最大垂直荷载时（如覆冰），要看哪种情况的 γ/σ 大小而定。也有用所谓临界温度、临界比载来判别。临界温度及临界比载均是基于电线覆冰时该气温或该覆冰比载下电线发生的弧垂与最高气温时的垂直弧垂相等的情况下求出的，判断最大弧垂不够直观，在此不再详述。

最简单的是最大弧垂比较法：当 $\dfrac{\gamma_7}{\sigma_7}>\dfrac{\gamma_1}{\sigma_1}$ 时，最大垂直弧垂发生在覆冰时，反之发生在最高气温时，γ_7、σ_7 为覆冰时的综合比载及应力；γ_1、σ_1 为最高气温时的自重力比载及应力。

需要说明的是，以往都是以覆冰、无风时的垂直

比载 γ_3 及相应的应力 σ_3 来比较最大弧垂，这是不够安全的，由于覆冰时多件有一定的风速，且弧垂有左右摆动震荡的可能，因此这里改用覆冰有风时的综合比载 γ_7 和相应的应力 σ_7 情况下的风偏弧垂作为可能发生最大的垂直弧垂进行比较，且省略 γ_3 时 σ_3 的专项应力计算。

上述 σ_1、σ_7 均指某一代表档距下的应力，随着代表档距不同而变，进行判别时要考虑应力的变化范围。

（四）连续档电线应力、弧垂曲线（常称力学特性或机械特性曲线）计算示例

【例 5-2】 本例是某 220kV 输电线路电线应力、弧垂曲线（常称力学特性或机械特性曲线）计算。导线为 JL/G1A-185 钢芯铝绞线，地线为 GJ-50 钢绞线，导地线参数见表 5-17。气象条件见表 5-18。

（1）导线及地线计算参数，见表 5-17。

表 5-17 导线及地线计算参数

项　　目		导线	地线
电线型号		JL/G1A-185	GJ-50
电线总截面积 A（mm²）		215.4	49.46
外径 d（mm）		19.0	9.0
弹性系数 E（N/ mm²）		84900	2×10^5
温度伸长系数 a（$\times10^{-6}$，℃）		18.9	12
综合破坏强度 σ_{ts}（N/mm²）		280	1200
使用安全系数 k_s		2.8	＞3.0
最大使用应力 σ_m（N/mm²）		100.0	＜400
平均运行应力限度 σ_{av}（N/mm²）		70	240
电线比载 [$\times10^{-3}$，N/（m·mm²）]	自重力比载 γ_1	35.8	85.7
	自重力加冰重力比载 γ_3（5，0）	51.6	125.7
	有风综合比载 γ_6（0，10）	36.3	86.8
	有风综合比载 γ_6（0，18）	40.8	96.4
	有风综合比载 γ_6（0，30）	54.4	125.8
	有风有冰综合比载 γ_7（5，10）	52.5	128.9

注　括号中数据为覆冰厚度和风速。

（2）计算气象条件。

表 5-18 计算气象条件

设计条件	气温（℃）	风速（m/s）	覆冰厚度（mm）
最高气温	+40	0	0
最低气温	−40	0	0
最大风	+10	30	0
覆冰	−5	10	5
雷电过电压	+15	10	0
操作过电压	+15	18	0
安装	−10	10	0
事故	−10	0	0
平均气温	+10	0	0

（3）导线临界档距计算与有效临界档距的选取。

1）可能控制条件，见表 5-19。

表 5-19 可能控制条件表

项目	大风	覆冰	低温	平均温度
允许应力 σ（N/mm²）	100	100	100	70
比载 $\gamma\times10^{-3}$ [N/（m·mm²）]	54.4	52.5	35.8	35.8
气温 t（℃）	10	−5	−40	+10
$\gamma/\sigma\times10^{-3}$（1/m）	0.544	0.525	0.358	0.511
γ/σ 由小到大的顺序编号	D	C	A	B

2）临界档距计算与组合。将上表中的可能控制条件相互组合代入式（5-36）或式（5-37）中，分别算出临界档距 l_{cr} 填入表 5-20 中。

表 5-20 临界档距组合表

A	B	C	D
$l_{cr(AB)}$=325▲ $l_{cr(AC)}$=328 $l_{cr(AD)}$=368	$l_{cr(BC)}$=361▲ $l_{cr(BD)}$=507	$l_{cr(CD)}$=581▲	

按照本节七、（二）、（1）中所述的原则，从表 5-20 中判断出有效临界档距为表中带▲的。

3）有效临界档距及有效控制条件控制的档距区间，如下所示。

控制区	A控区	$l_{cr(AB)}$	B控区	$l_{cr(BC)}$	C控区	$l_{cr(CD)}$	D控区
档距(m)	0	325		361		581	∞

（4）导线各气象条件下的应力弧垂计算。以档距各区间的有效控制条件作为已知条件，利用式（5-18）的应力状态方程式计算有关气象条件下的应力。用表5-14 中的平抛物线弧垂公式计算最大弧垂及+15℃、无风、无冰时的弧垂。应力及弧垂计算结果列于表 5-21 及图 5-10 中。

（5）地线在雷电过电压情况（+15℃、无风、无冰）下的应力推算。地线应力的计算一般均以雷电过电压情况（+15℃、无风、无冰）下，导、地线在档距中央的间距满足（$0.012l+1$）m 的要求，根据杆塔上导、地线悬挂点间最小（或杆塔可能组合的平均最小）垂直间距和水平间距及导线在该气象情况下的应力，推求地线在该气象情况下各档距的应力。将其作为已知的有效控制条件，推求其他气象条件下的应力。当推求出其他控制条件下的应力超出允许值时，应增大杆塔上导、地线悬挂点间的垂直间距来解决。

本例题已知杆塔上导、地线悬挂点间的垂直间距 h =4.2m；水平间距 s =1.5m。从图 5-9 中查得导、地线间距刚好满足要求时的控制档距 l_c =575m。对耐张段内代表档距 l_r 很小时（如 100～300m）不可能出现 575m 的档距。可将 l_c 取小一些，进一步放松地线应力。但为保证地线弧垂小于导线弧垂，本例题对各代表档距下均取 l_c 为 575m。将表 5-22 中算得的导线+15℃、无风、无冰情况下的应力和比载以及 $l_c = l_x$ 代入式（5-34），求得地线在该气象情况下的应力为：

$$\sigma_g = \frac{r_g}{\dfrac{r_c}{\sigma_c} - \dfrac{8\times\left[\sqrt{(1+0.012\times l_c)^2 - 1.5^2} - 4.2\right]}{l_c^2}} = \frac{85.7\times10^{-3}}{\dfrac{0.0358}{\sigma_c} - 0.086\times10^{-3}}$$

式中：地线比载 r_g=85.7×10^{-3}N/（m · mm^2）；导线比载 r_c=35.8×10^{-3}N/（m · mm^2）。由上式算得各代表档距下+15℃、无风、无冰情况时的地线应力 σ_g 列于表 5-21 中。

表 5-21 GJ-50 地线+15℃、无风、无冰情况下应力 σ_g 计算示例表

代表档距 l_{cr}（m）	150	200	250	325	361
导线应力 σ_c（N/mm^2）	47.4	54.7	60.8	68.0	68.2
控制档距 l_{cr}（m）	575	575	575	575	575
地线应力 σ_g（N/mm^2）	128	150.8	170.5	194.6	195.3
地线弧垂 f（m）	1.88	2.84	3.93	5.81	7.15
代表档距 l_{cr}（m）	400	500	581	600	700
导线应力 σ_c（N/mm^2）	68.3	68.4	68.4	68.3	67.5
控制档距 l_{cr}（m）	575	575	575	575	575
地线应力 σ_g（N/mm^2）	195.6	196.0	196.0	195.6	192.9
地线弧垂 f（m）	8.76	13.66	18.45	19.72	27.21

以表 5-21 中的地线应力为已知条件，计算其他气象条件下的应力、弧垂，其计算方法与表 5-22 中导线应力弧垂计算相似（如雷电、操作、高温气象条件可不必计算）。

表 5-22　　　　**JL/G1A-185 导线应力、弧垂计算示例表**

计算公式 $\sigma^2(\sigma+a)=b$；$f=\dfrac{\gamma l^2}{8\sigma}$；$a=\dfrac{El^2\gamma_m^2}{24\sigma_m^2}-\sigma_m+aE(t-t_m)=F_m+aEt$；$F_m=\dfrac{El^2\gamma_m^2}{24\sigma_m^2}-\sigma_m-aEt_m$；$b=\dfrac{El^2\gamma^2}{24}=Bl^2$；$B=\dfrac{E\gamma^2}{24}$

本例中 a=18.86×10⁻⁶1/℃，E=84 900N/mm²。

已知条件

条件 / 控制档距区间（m） / 数据	低温	平均温度	覆冰	大风
控制档距区间（m）	0～325	325～361	361～581	581～∞
t_m（℃）	−40	+10	−5	+10
δ_m（mm）	0	0	5	0
v_m（m/s）	0	0	10	30
$\gamma_m\times10^{-3}$ [N/（m·mm²）]	35.8	35.8	52.5	54.4
σ_m（N/mm²）	100	70	100	100
aEt_m	−64.0	16.0	−8.0	16.0

待求条件

条件 / 数据	最高气温	最低气温	平均气温	事故	雷电过电压		操作过电压	安装	覆冰	最大风
t（℃）	+40	−40	+10	−10	+15		+15	−10	−5	10
δ（mm）	0	0	0	0	0		0	0	5	0
v（m/s）	0	0	0	0	10	0	18	10	10	30
γ_m [×10⁻³，N/（m·mm²）]	35.8	35.8	35.8	35.8	36.3	35.8	40.8	36.3	52.5	54.4
B	4.56	4.56	4.56	4.56	4.66	4.56	5.9	4.66	9.75	10.48
aEt	64.0	−64.0	16.0	−16.0	24.0	24.0	24.0	−16.0	−8.0	16.0

续表

条件 数据			最高气温				最低气温		平均气温		事故		雷电过电压（无风）			雷电过电压（有风）			安装		操作过电压			覆冰			最大风		
l	σ_m	k_m	$b\times10^3$	a	σ	f	a	σ	a	σ	a	σ	a	σ	f	$b\times10^3$	a	σ	a	σ	$b\times10^3$	a	σ	$b\times10^3$	a	σ	$b\times10^3$	a	σ
150	100	−25.7	102.7	38.3	37.0	2.73		100	−9.7	50.3	−41.7	65.6	−1.7	47.4	2.13	105	−1.7	47.7	−41.7	65.9	133	−1.7	51.6	220	−33.7	74.0	236	−9.7	65.2
200	100	−17.7	182.5	46.3	44.8	4.0		100	−1.7	57.3	−33.7	70.5	6.3	54.7	3.28	186.5	6.3	55.1	−33.7	70.9	236	6.3	59.8	290	−25.7	82.7	420	−1.7	75.5
250	100	−7.5	285	56.5	51.4	5.46		100	8.5	63.3	−23.5	74.6	16.5	60.8	4.62	291	16.5	61.2	−23.5	75.1	369	16.5	66.6	610	−15.5	90.3	655	8.5	84.1
325	100	12.1	482	76.1	59.6	7.95		100	28.1	70.0	−3.9	79.7	36.1	68.0	6.96	492	36.1	68.5	−3.9	80.2	623	36.1	74.9	1003	4.1	99.6	1107	28.1	94.9
361	100	35.4	595	99.4	61.0	9.60	−28.6	94.7	51.4	70.0	19.4	78.1	59.4	68.2	8.60	608	59.4	68.8	19.2	78.7	770	59.4	75.5			100	1367	51.4	96.2
400	100	64.0	730	128	62.0	11.6	0	90.0	80.0	69.8	48.0	76.5	88.0	68.3	10.51	745	88.0	68.9	48.0	77.1	945	88.0	76.0			100	1675	80.0	97.2
500	100	152	1140	216	63.9	17.56	88.0	82.0	168	69.3	136	73.8	176	68.4	16.4	1165	176	69.0	136	74.4	1477	176.0	76.5			100	2620	168	99.0
581	100	238	1544	302	64.9	23.4	174	78.3	254	69.1	222	72.5	262	68.4	22.2	1575	262	69.0	222	73.0	2000	262	76.9	3300	230	100	3540	254	100
600	100	261	1644	325	65.0	24.85	197	77.5	277	68.9	245	72.0	285	68.3	23.6	1680	285	69.0	245	72.7	2130	285	76.7	3510	253	99.8			100
700	100	398	2235	462	65.0	33.8	334	74.0	414	68.0	382	70.2	422	67.5	32.6	2285	422	68.2	382	71.1	2900	422	76.3	4780	390	98.9			100

注　最大弧垂发生于 r/σ 最大值的最高气温情况。应力、弧垂曲线绘于图 5-10 中。

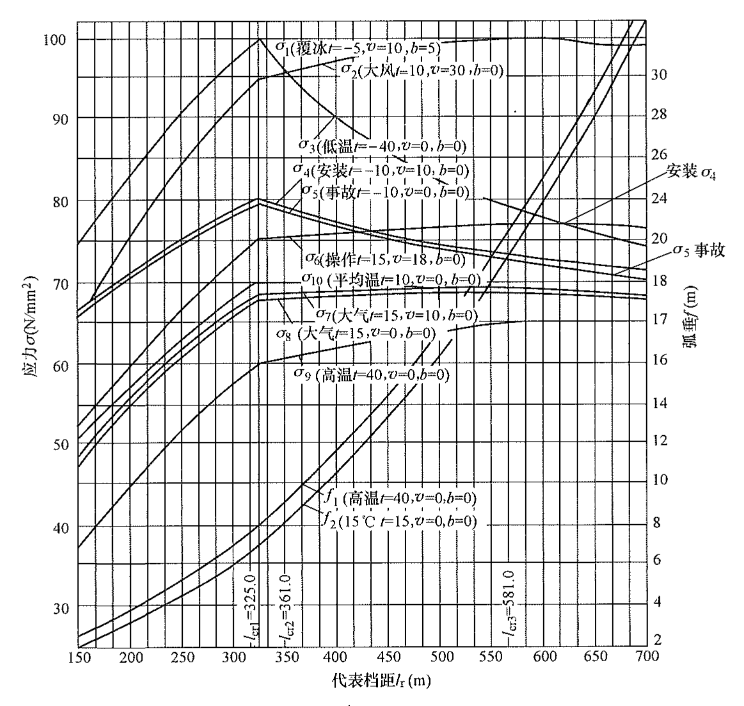


图 5-10　导线应力弧垂曲线示例

八、具有非均布荷载的孤立档电线应力弧垂计算

非均布荷载的孤立档系指该档两侧用耐张塔与其他档隔开且电线上附加有集中荷载（如耐张绝缘子串，T 接引下线，上人检修等）的档距。这种档距在变电站进出口及站内架空母线，线路跨越重要设施等地方经常出现。

由于孤立档内的电线上附加了集中的或不均匀分布的荷载，对电线的应力、弧垂，线长等计算产生影响（不同于均匀荷载），特别在档距较小（如 200m 以下），耐张绝缘子串的均布单位荷载远大于电线的单位荷载时，其影响更甚，若用一般的均布荷载计算法（不计算集中荷载及耐张串荷载），所产生的应力弧垂计算误差将达到不能容许的程度，故对这种档距应逐档分别计算或校验。

（一）孤立档电线弧垂计算

对于电线两端具有耐张绝缘子串及档内悬有集中荷载（见图 5-11）的电线任一点弧垂按式（5-39）计算。

$$f_x=\frac{\tau_A x-M_x}{\sigma_0}\tag{5-39}$$

式中　f_x——档距内距悬挂点 x 处 C 点的电线弧垂，m；

σ_0——电线水平应力，N/mm²；

τ_A——档内折换到导线单位截面上的全部荷载在悬点 A 引起的相当于简支梁的支点切应力，N/mm²；

M_x——x 长度内（即 C 点左侧）各单位截面上的荷载对 C 点的弯矩，N·m/mm²。

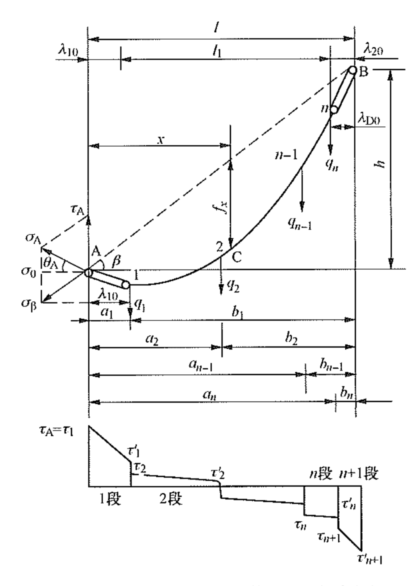


图 5-11　孤立档的荷载及切应力图

$$\tau_A=\frac{1}{l}\left[\sum\frac{\gamma}{\cos\beta}\Delta l\left(\frac{\Delta l}{2}+b_\gamma\right)+\sum qb\right]\tag{5-40}$$

式中　l——档距，m；

γ——均布荷载段沿线轴的比载，N/mm²；

β——悬点间高差角，(°)；

Δl ——均布荷载段水平长度，m；

b_γ ——均布荷载段末端至悬点 B 的水平距离，m；

q ——单位截面上的集中荷载，N/mm²；

b ——集中荷载至悬点 B 的水平距离，m。

对于两端悬挂相同耐张绝缘子串且具有不同数量的集中荷载时，利用式（5-39）以斜抛物线方程化简为表 5-23 中所列的算式。

（二）孤立档电线应力状态方程式

（1）由于集中荷载作用，计算线长和应力时也要考虑其影响，若不考虑施工过牵引及杆塔挠度的因素，按斜抛物线方程求得电线的应力状态方程式为

$$\sigma_n^2\left\{\sigma_n+\left[\frac{K_m}{\sigma_m^2}-\sigma_m+\alpha E\cos\beta\times(t_n-t_m)\right]\right\}=K_n \quad (5\text{-}41)$$

式中 σ_m、σ_n ——分别为已知情况和待求情况的水平应力，N/mm²；

t_m、t_n ——分别为已知情况和待求情况的气温，℃；

α、E ——分别为电线的温度线膨胀系数，1/℃；弹性系数，N/mm²；

β ——电线悬挂点高差角，(°)（等高时 $\beta=0°$），$k_m=\dfrac{K_m}{\sigma_m^2}-(\sigma_m+\alpha E\cos\beta t_m)$ 为已知条件系数；

K_m、K_n ——分别为已知情况和待求情况电线的线长参数，可按式（5-43）或表 5-23 中的公式计算。

（2）当孤立档架设挂线时，为使紧线侧的耐张绝缘子串容易挂到杆塔的悬挂点上，往往要将绝缘子串拉出档外一段长度 ΔL（即过牵引长度），当档距较小时，这种过牵引引起的应力增加很大，往往使电线和杆塔不能承受，因此一般要采用各种措施减少过牵引长度到 50～200mm 范围，且要对过拉时的应力和杆塔强度等进行验算，其应力状态方程式为

$$\sigma_n^2\left\{\sigma_n+\left[\frac{K_m^2}{\sigma_m^2}-\sigma_m+\alpha E\cos\beta\times(t_n-t_m)-\frac{E\Delta L\cos^2\beta}{l_1}\right]\right\}=K_n \quad (5\text{-}42)$$

式中 ΔL ——挂线时绝缘子串过拉长度，m；

l_1 ——扣除两侧绝缘子串的档距长度，m，参见图 5-11；

其他符号含义同式（5-41）。

（3）应力状态方程式中的 K 值计算：K 值系计算线长中的参数，因此，它和各种情况下的荷载大小及布置位置有关，其普遍算式为

$$K=\frac{E\cos^6\beta}{6l_1}\sum\frac{[\tau_i^3-(\tau_i')^3]}{\gamma_i} \quad (5\text{-}43)$$

式中 τ_i、τ_i' ——第 i 个均布荷载段左、右两端的简支梁荷载切应力，N/mm²。

γ_i ——第 i 个均布荷载段单位长度上的比载，N/（m·mm²），对导线为 γ；对耐张绝缘子串，亦假定为均布荷载，折算到导线单位截面上的绝缘子串单位长度上的比载 $\gamma_s=\dfrac{G}{A\lambda}$。$G$ 为耐张串荷载，N；λ 为串长，m；A 为导线截面积，mm²。

β ——档距两端导线悬挂点间的高差角，$\beta=\arctan\left(\dfrac{h}{l}\right)$，(°)。

E ——导线弹性系数，N/mm²。

当两端悬挂相同耐张绝缘子串，且具有不同数量的集中荷载时，利用式（5-43）以斜抛物线方程化简 K 值计算式列于表 5-23。表中公式内的集中荷载编号与 a、b 脚注号与表中附图相对应（与图 5-11 有别）。当两端耐张串不同时，若利用表 5-23 中的算式，可近似取两耐张串的长度和荷载平均值作为两端具有相同的耐张串来计算。

（三）孤立档电线应力中的有效控制条件判别与选定

（1）孤立档的已知控制条件。对于进出变电站的孤立档，除由于变电站进出线构架在各种情况下允许的最大使用张力外（如覆冰、大风、安装过牵引等情况），还往往因档内有旁路母线等被跨越物要求在不同情况下保证一定的跨越间距，而限定电线的最小允许张力或应力（如最高气温、带电上人检修等情况）。在进行孤立档的施工应力、弧垂计算前，首先根据构架和初步设定的终端杆塔高度以及被跨越物尺寸、集中引下线等参数，由各种情况下交叉物上方允许的最大弧垂 f_x 求出最小容许的应力，作为已知可能控制条件之一。各种情况下允许的各种最大应力也是已知可能控制条件。然而真正起控制作用的往往只有其中之一，即有效控制条件，可利用已知条件的 k 系数来判定。

（2）孤立档的已知控制条件的 k 系数式。

1）最大允许应力条件的 k 系数式：

当非挂线过牵引情况时（如覆冰、大风等）

$$k_{aM_x}=\frac{K_{M_x}}{\sigma_{M_x}^2}-(\sigma_{M_x}+\alpha E\cos\beta t_{M_x}) \quad (5\text{-}44)$$

式中 K_{M_x} ——线长参数；

σ_{M_x} ——最大允许应力，N/mm²；

t_{M_x} ——气温，℃；

α、E、β 的含义同式（5-41）、式（5-42）。

当挂线过牵引长度为 ΔL 时

$$k_{aM}=\frac{K_M}{\sigma_M^2}-\left(\sigma_M+\alpha E\cos\beta t_M-\frac{\Delta LE\cos^2\beta}{l_1}\right) \quad (5\text{-}45)$$

式中 K_M ——过牵引时的线长参数；

σ_M ——过牵引时的最大允许应力，N/mm²；

t_M ——过牵引时的气温，℃；

ΔL ——允许过牵引长度，m；

α、E、β、l_1 的含义同式（5-41）、式（5-42）。

表 5-23　　孤立档应力、弧垂计算公式汇总表

情况	简图	公式
施工观测弧垂情况（一侧有绝缘子串，无集中荷重）		$K=\frac{\gamma^2E\cos^3\beta}{24}\times\left[l_1(l_1+3\lambda_0)+\frac{6\lambda_0G}{AW_1\gamma_\beta}\times\left(W_1+\frac{2G}{3A}\right)-\frac{3\lambda_0^2\left(W_1+\frac{G}{A}\right)^2}{W_1\gamma_\beta l}\right]$ $f_m=\frac{1}{\sigma_0\cos\beta}\left[\frac{\gamma l^2}{8}+\frac{(\gamma_s-\gamma)\lambda_0^2}{4}+\frac{(\gamma_s-\gamma)^2\lambda_0^4}{8\gamma l^2}\right]$
竣工情况（两侧绝缘子串相同，无集中荷重）		$K=\frac{\gamma^2E\cos^3\beta}{24}\left[l_1(l_1+6\lambda_0)+\frac{12\lambda_0G}{AW_1\gamma_\beta}\left(W_1+\frac{2G}{3A}\right)\right]$ $f_m=\frac{1}{\sigma_0\cos\beta}\left[\frac{\gamma l^2}{8}+\frac{(\gamma_s-\gamma)\lambda_0^2}{2}\right]$ 当 $\lambda\leqslant x\leqslant l-\lambda_0$ 时： $f_m=\frac{1}{\sigma_0\cos\beta}\left[\frac{\gamma\cdot x(l-x)}{2}+\frac{(\gamma_s-\gamma)\lambda_0^2}{2}\right]$
竣工情况（两侧绝缘子串相同，一个集中荷重）		$K=\frac{\gamma^2E\cos^3\beta}{24}\left\{l_1(l_1+6\lambda_0)+\frac{12}{W_1\gamma_\beta}\times\left[\frac{G\lambda_0}{A}\left(W_1+\frac{2G}{3A}+q\right)+qab\left(\gamma_\beta+\frac{q}{l}\right)\right]\right\}$ 当 $\lambda_0\leqslant x\leqslant a$ 时： $f_m=\frac{1}{\sigma_0\cos\beta}\left[\frac{\gamma\cdot x(l-x)}{2}+\frac{(\gamma_s-\gamma)\lambda_0^2}{2}\right]+\frac{xqb}{\sigma_0 l}$ 当 $a\leqslant x\leqslant l-\lambda_0$ 时： $f_m=\frac{1}{\sigma_0\cos\beta}\left[\frac{\gamma\cdot x(l-x)}{2}+\frac{(\gamma_s-\gamma)\lambda_0^2}{2}\right]-\frac{(l-x)qa}{\sigma_0 l}$
竣工情况（两侧绝缘子串相同，两个集中荷重）		$K=\frac{\gamma^2E\cos^3\beta}{24}\left\{l_1(l_1+6\lambda_0)+\frac{12}{W_1\gamma_\beta}\left[\frac{G\lambda_0}{A}\left(W_1+\frac{2G}{3A}+q_1+q_2\right)+q_1a_1b_1\left(\gamma_\beta+\frac{q_1}{l}\right)+q_2a_2b_2\left(\gamma_\beta+\frac{q_2}{l}\right)+\frac{2q_1q_2a_1b_2}{l}\right]\right\}$ 当 $\lambda_0\leqslant x\leqslant a_1$ 时： $f_x=\frac{1}{\sigma_0\cos\beta}\left[\frac{\gamma\cdot x(l-x)}{2}+\frac{(\gamma_s-\gamma)\lambda_0^2}{2}\right]+\frac{x(q_1b_1+q_2b_2)}{\sigma_0 l}$ 当 $a_1\leqslant x\leqslant a_2$ 时： $f_x=\frac{1}{\sigma_0\cos\beta}\left[\frac{\gamma\cdot x(l-x)}{2}+\frac{(\gamma_s-\gamma)\lambda_0^2}{2}\right]+\frac{x(q_1b_1+q_2b_2)-lq_1(x-a_1)}{\sigma_0 l}$ 当 $a_2\leqslant x\leqslant l-\lambda_0$ 时： $f_x=\frac{1}{\sigma_0\cos\beta}\left[\frac{\gamma\cdot x(l-x)}{2}+\frac{(\gamma_s-\gamma)\lambda_0^2}{2}\right]+\frac{(l-x)(q_1a_1+q_2a_2)}{\sigma_0 l}$

续表

情况	简　　图	公　　式
竣工情况（两侧绝缘子串相同，n 个集中荷重）		$K=\frac{\gamma^2 E\cos^3\beta}{24}\left\{l_1(l_1+6\lambda_0)+\frac{12}{W_1\gamma_\beta}\left[\frac{G\lambda_0}{A}\left(W_1+\frac{2G}{3A}+\sum_q\right)+\sum_1^n qab\left(\gamma_\beta+\frac{q}{l}\right)+\frac{2}{l}\left(q_1a_1\sum_2^n qb+q_2a_2\sum_3^n qb+\cdots+q_{n-1}a_{n-1}q_nb_n\right)\right]\right\}$ 当 $\lambda_0\leqslant x\leqslant a_1$ 时： $f_x=\frac{1}{\sigma_0\cos\beta}\left[\frac{\gamma\cdot x(l-x)}{2}+\frac{(\gamma_s-\gamma)\lambda_0^2}{2}\right]+\frac{x\sum_1^n qb}{\sigma_0 l}$ 当 $a_{i-1}\leqslant x\leqslant a_i$ 时： $f_x=\frac{1}{\sigma_0\cos\beta}\left[\frac{\gamma\cdot x(l-x)}{2}+\frac{(\gamma_s-\gamma)\lambda_0^2}{2}\right]+\frac{x\sum_1^n qb-l\sum_1^{i-1}q(x-a)}{\sigma_0 l}$ 当 $a_n\leqslant x\leqslant l-\lambda_0$ 时： $f_x=\frac{1}{\sigma_0\cos\beta}\left[\frac{\gamma\cdot x(l-x)}{2}+\frac{(\gamma_s-\gamma)\lambda_0^2}{2}\right]+\frac{\sum_1^n qa(l-x)}{\sigma_0 l}$

注　K——应力状态方程中的系数；

f_m——档距内最大弧垂，m；

f_x——距悬挂点 A 为 x 处的弧垂，m；

β——两悬挂点的高差角，(°)；

l——档距，m；

l_1——电线所占档距长度，m；

λ——绝缘子串长度，m；

$\lambda_0=\lambda\cos\beta$——绝缘子串水平投影长，m；

G——绝缘子串荷载，N；

γ——电线比载，N/（m・mm²）；

$\gamma_s=G/\lambda A$——绝缘子串比载，N/（m・mm²）；

A——电线截面，mm²；

q——集中荷载的单位截面荷载，N/ mm²；

a、b——分别为集中荷载距左右两端悬挂点的距离，m；

σ_0——电线水平应力，N/ mm²；

E——电线弹性系数，N/ mm²；

$W_1=\gamma l_1/\cos\beta$——电线单位截面上的荷载，N/ mm²；

$\gamma_\beta=\gamma/\cos\beta$——电线水平投影比载，N/（m・mm²）；

x——距左侧悬挂点 A 的水平距离，m。

2）最小允许应力条件的 k 系数计算式：

$$k_{bmx}=\frac{K_{mx}}{\sigma_{mx}^2}-(\sigma_{mx}+\alpha E\cos\beta t_{mx}) \qquad (5\text{-}46)$$

式中　K_{mx}——最小允许应力时的线长参数；

σ_{mx}——允许最小应力，N/mm²；

t_{mx}——允许最小应力时的气温，℃；

α、E、β 的含义同式（5-41）。

（3）有效控制条件的判别与选定。

式（5-44）、式（5-45）算出的最大允许应力条件下的 k_{aMx} 及 k_{aM} 中，取其中最大者 k_{amax}；用式（5-46）算出的最小允许应力条件下的 k_b 中取其中最小者

F_{bmin}。两者必须满足

$$k_{amax} \leqslant k_{bmin} \tag{5-47}$$

若不满足式（5-47）的判别关系，可升高杆塔高度、减小最小允许应力而使 k_{bmin} 增大，达到满足上式条件；当 k_{bmin} 与 k_{amax} 相比过大时，可降低杆塔高使两者接近。取两者的某一中间值 k_m 作为已知的有效控制条件，以此值代入式（5-41）、式（5-42）中的 k_m 推求所有已知控制条件及施工架线应力，均能满足要求。

当线下无交叉跨越，且对地间距较高，无最小允许应力控制条件时，各最大允许应力控制条件中的最大者 k_{amax} 即为有效控制条件。或取某一适当大于 k_{amax} 的 k_m 值作为已知的有效控制条件代入式（5-41）、式（5-42）的 k_m 中推求其他应力，此时意味着适当减小最大使用应力。参见［例 5-3］中 k 值的判别与选定。

【例 5-3】 某一 220kV 输电线路的进变电站孤立档，其档内断面图如图 5-12 中所示。

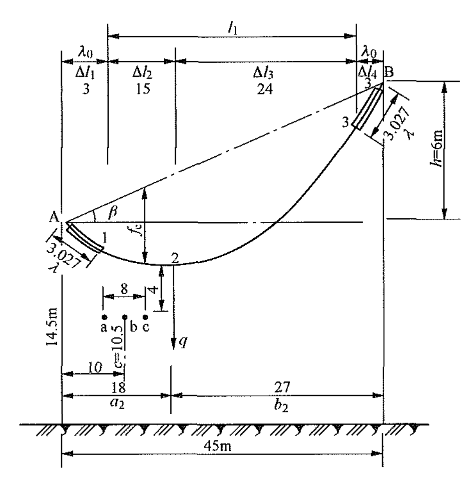


图 5-12 孤立档计算图例

导线每相为单根 JL/G1A—300/40 钢芯铝绞线，截面积 A=338.99mm²，弹性系数 E=73000N/mm²，温度线膨胀系数 α=19.6×10⁻⁶（1/℃），自重比载 γ_1=0.032777N/（m·mm²），覆冰时的综合比载 γ_7=0.061 284N/（m·mm²）。档中有一集中引下线荷载估算为 10m 引下线，其单位截面的自重荷载 q_1=0.32777N/mm²，覆冰时的综合荷载 q_7=0.61284N/mm²。两端悬挂相同的耐张绝缘子串，串长 λ=3.027m，$\lambda_0=\lambda\cos\beta$=3.0m，串的自重荷载 G_1=1200N $\gamma_{s1}=\dfrac{G_1}{A\lambda}$=1.1695N/（m·mm²），串覆冰，有风时的综合荷载 G_7=1800N，γ_{s7}=1.7542N/（m·mm²）。进线档内跨越 10.5m 高的旁路母线（如图中 a、b、c 点），假定+40℃最高气温时导线对旁路母线的间距 $s \geqslant$ 4m。施工挂线过牵引导线 ΔL=0.1m 时，导线最大张力不大于 10000N；最大荷载时最大允许张力不大于 9000N。试计算导线架设时的观测与竣工弧垂及应力。

1. 根据对旁路母线的间距要求，计算导线允许的最小应力

首先，计算旁路母线 a、b、c 上方导线最大允许弧垂：先假定终端塔呼称高为 20.5m，其他尺寸参见图 5-12 中所示，则

$$\begin{aligned} k_{aM} &= h_A + x_1 \tan\beta - (c+d) \\ &= 14.5 + 6\times\frac{6}{45} - (10.5+4) \\ &= 0.8\text{m} \end{aligned}$$

$$k_{bM} = 14.5 + 10\times\frac{6}{45} - 14.5 = 1.333\text{m}$$

$$k_{cM} = 14.5 + 14\times\frac{6}{45} - 14.5 = 1.8667\text{m}$$

利用式（5-39）求导线容许最小应力：先计算式中的 A 悬挂点简支梁切应力 τ_A，由 $\sum M_B = 0$ 参见式（5-40）算得

$$\begin{aligned} \tau_A &= \frac{1}{l}\left[\sum\frac{\gamma}{\cos\beta}\Delta l\left(\frac{\Delta l}{2}+b_r\right)+\sum qb\right] \\ &= \frac{1}{45}\times\left[\frac{1.1695}{0.9912}\times3\times\left(\frac{3}{2}+42\right)+\frac{0.032777}{0.9912}\times15\right]\times\left(\frac{15}{2}+27\right)+\frac{0.032777}{0.9912}\times24\times\left(\frac{24}{2}+3\right) \\ &\quad +\frac{1.1695}{0.9912}\times3\times\frac{3}{2}+0.32777\times27 = 4.381\text{N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\sigma_{0a} = \frac{\tau_A x_a - M_a}{f_{aM}} = \frac{1}{0.8}\times\left\{4.381\times6-\left[\frac{1.169\times3}{0.9912}\times4.5+\frac{0.032777}{0.9912}\times\frac{(6-3)^2}{2}\right]\right\} = 12.76\text{N/mm}^2$$

用表 5-23 中的简化式计算：

$$\sigma_{0a}=\frac{1}{k_{aM}\cos\beta}\times\left[\frac{\gamma x_a(l-x_a)}{2}+\frac{(\gamma_s-\gamma)\lambda_0^2}{2}+\frac{x_a qb\cos\beta}{l}\right]=\frac{1}{0.8\times0.9912}$$

$$\times\left[\frac{0.032777\times6\times39}{2}+\frac{(1.169-0.0328)\times3^2}{2}+\frac{6\times0.032777\times27}{45}\times0.9912\right]=12.76\text{N}/\text{mm}^2$$

与式（5-41）计算结果相同；

$$\sigma_{0b}=\frac{1}{1.333\times0.9912\times2}\times\left[0.032777\times10\times35+(1.169-0.0328)\times3^2+2\times10\times0.32777\times27\times0.9912/45\right]$$

$$=9.686\text{N}/\text{mm}^2$$

$$\sigma_{0c}=\frac{1}{1.8667\times0.9912\times2}\times\left[0.032777\times14\times31+(1.169-0.0328)\times3^2+2\times14\times0.32777\times27\times0.9912/45\right]$$

$$=8.082\text{N}/\text{mm}^2$$

取上面 3 个最低应力为最大的作为最高气温允许最低应力才能保证导线对 a、b、c 三相旁路母的间距 $d\geqslant4\text{m}$，即取 $\sigma_{0\min}=12.8\text{N}/\text{mm}^2$ 作为已知可能控制条件之一。

2. 计算状态方程式中的 K 值

（1）无冰、无风、有引下线、两端有耐张串时的 K_1。

利用普遍式（5-43）计算 K_1 前，先计算各区段左、右端的简支梁切应力

$$\tau_1=\tau_A=4.381\text{N}/\text{mm}^2$$

$$\tau_1'=\tau_1-\frac{G_1}{A}=4.381-\frac{1200}{338.99}=0.841\text{N}/\text{mm}^2$$

$$\tau_2=\tau_1'=0.841\text{N}/\text{mm}^2$$

$$\tau_2'=\tau_2-\Delta l_2\times\gamma_1/\cos\beta=0.841-15\times0.032777/0.9912=0.345\text{N}/\text{mm}^2$$

$$\tau_3=\tau_2'-q_1=0.345-0.328=0.017\text{N}/\text{mm}^2$$

$$\tau_3'=\tau_3-\Delta l_3\gamma_1/\cos\beta=0.017-24\times0.032777/0.9912=-0.776\text{N}/\text{mm}^2$$

$$\tau_4=\tau_3'=-0.776\text{N}/\text{mm}^2$$

$$\tau_4'=\tau_B=\tau_4-\frac{G_1}{A}=-0.776-\frac{1200}{338.99}=-4.316\text{N}/\text{mm}^2$$

校核：

$$\tau_B=\tau_A-\left(\sum\frac{\gamma}{\cos\beta}\Delta l+\sum_q\right)=4.381-\left(2\times\frac{1200}{338.99}+\frac{39\times0.03278}{0.9912}+0.3278\right)=-4.316\text{N}/\text{mm}^2$$

与上计算一致。将上面的 τ 值代入式（5-43）得

$$K_1=\frac{E\cos^6\beta}{6l_1}\sum\frac{\zeta_i^3-\zeta_i'^3}{\gamma}$$

$$=\frac{73000\times0.9912^6}{6\times39}\times\left[\frac{4.381^3-0.841^3}{1.169}+\frac{0.841^3-0.345^3}{0.032777}+\frac{0.017^3-(-0.776)^3}{0.032777}+\frac{(-0.776)^3-(-4.316)^3}{1.1695}\right]$$

$$=50575$$

用表 5-23 中的简化式计算 K_1：

已知：$W_{11}=l_1\gamma_1/\cos\beta=\frac{39\times0.032777}{0.9912}=1.28965$。

$$K_1=\frac{\gamma_1^2E\cos^3\beta}{24}\left\{l_1(l_1+6\lambda_0)+\frac{12}{W_{11}\gamma_{\beta1}}\left[\frac{G_1\lambda_0}{A}\left(W_{11}+\frac{2G_1}{3A}+q_1\right)+q_1ab\left(\gamma_{\beta1}+\frac{q_1}{l}\right)_l\right]\right\}$$

$$=\frac{0.03278^2\times73000\times0.9912^3}{24}\times\left\{39\times(39+6\times3)+\frac{12\times0.9912}{1.28965\times0.03278}\times\right.$$

$$\left.\left[\frac{1200\times3}{338.99}\times\left(1.28965+\frac{2\times1200}{3\times338.99}+0.32777\right)+0.32777\times18\times27\times\left(\frac{0.32777}{0.9912}+\frac{0.32777}{45}\right)\right]\right\}$$

$$=50652$$

与普遍式计算基本相同，差别仅系数字上的微小误差，非公式不一致。

（2）无冰、无风、无引下线、两端有耐张串时的施工挂线情况的 K_{10}。

用表 5-23 中的简化式计算 K_{10}

已知：$W_{11}=l_1\gamma_1/\cos\beta=1.28965$，$q=0$。

$$K_{10}=\frac{0.03278^2\times73000\times0.9912^3}{24}\times\left\{39\times(39+6\times3)+\frac{12\times0.9912}{1.28965\times0.03278}\times\left[\frac{1200\times3}{338.99}\times\left(1.28965+\frac{2\times1200}{3\times338.99}\right)\right]\right\}=41789$$

（3）无冰、无风、无引下线，仅一端有耐张串时观测弧垂情况的 K'_{10}。

用表 5-22 中的公式计算

已知：$l_1=l-\lambda_0=45-3=42$，$W_{11}=l_1\gamma_1/\cos\beta=\dfrac{42\times0.032777}{0.9912}=1.38886$。

$$K'_{10}=\frac{\gamma_1^2E\cos^3\beta}{24}\times\left[l_1(l_1+3\lambda_0)+\frac{6\lambda_0G_1}{AW_{11}\gamma_{\beta1}}\times\left(W_{11}+\frac{2G_1}{3A}\right)-\frac{3\lambda_0^2\left(W_{11}+\dfrac{G_1}{A}\right)^2}{LW_{11}\gamma_{\beta1}}\right]=\frac{0.03278^2\times73000\times0.9912^3}{24}\times$$

$$\left[42\times(42+3\times3)+\frac{6\times3\times1200\times0.9912}{338.99\times1.3889\times0.03278}\times\left(1.3889+\frac{2\times1200}{3\times338.99}\right)-\frac{3\times3^2\left(1.3889+\dfrac{1200}{338.99}\right)^2\times0.9912}{45\times1.3889\times0.032777}\right]=22357.0$$

（4）有冰、有风、有引下线、两端有耐张串时的 K_7。

用表 5-23 中的公式计算

已知：$W_{17}=l_1\gamma_7/\cos\beta=\dfrac{39\times0.061248}{0.9912}=2.4113\text{N/mm}^2$。

$$K_7=\frac{\gamma_7^2E\cos^3\beta}{24}\left\{l_1(l_1+6\lambda_0)+\frac{12}{W_{17}\gamma_{\beta7}}\left[\frac{G_7\lambda_0}{A}\left(W_{17}+\frac{2G_7}{3A}+q_7\right)+q_7ab\left(\gamma_{\beta7}+\frac{q_7}{l}\right)\right]\right\}$$

$$=\frac{0.061284^2\times73000\times0.9912^3}{24}\times\left\{39\times(39+6\times3)+\frac{12\times0.9912}{2.4113\times0.061284}\times\right.$$

$$\left.\left[\left(2.4113+\frac{2\times1800}{3\times338.99}+0.061284\right)\times\frac{1800\times3}{338.99}+0.061284\times18\times27\times\left(\frac{0.061284}{0.9912}+\frac{0.061284}{45}\right)\right]\right\}$$

$$=138481.0$$

3. 判断有效控制条件

（1）已知可能控制条件有 3 种：

1）最高气温：t=40℃、v=0、δ=0，最小允许应力 $\sigma_{0\min}$=12.8N/mm², K_1=70650；

2）覆冰情况：t=−5℃、v=10m/s、δ=10mm，最大允许应力 $\sigma_{0\max1}=\dfrac{9000}{338.99}$=26.55N/mm²，$K_7$=138481；

3）安装过牵引 Δl=0.1m 情况：t=—10℃、v=0、δ=0，最大允许应力 $\sigma_{0\max2}=\dfrac{10000}{338.99}=29.5\text{N/mm}^2$，$K_{10}$=41780。

（2）参照式（5-44）～式（5-46）列出已知可能控制条件的 k 式，判别和选定有效控制条件：

1）最高气温：

$$k_{\rm bm}=\frac{K_1}{\sigma_{0\min}^2}-(\sigma_{0\min}+t_{\max}aE\cos\beta)$$

$$=\frac{70650}{12.8^2}-(12.8+40\times19.6\times10^{-6}\times73000\times0.9912)=316.7$$

2）覆冰情况：

$$k_{aM1}=\frac{K_7}{\sigma_{0\max1}^2}-(\sigma_{0\max1}+t_{-5}aE\cos\beta)$$
$$=\frac{138481}{26.55^2}-(26.55-5\times19.6\times10^{-6}\times73000\times0.9912)=177.0$$

3）安装过牵引情况：

$$k_{aM2}=\frac{K_{10}}{\sigma_{aM2}^2}-\left(\sigma_{aM2}+t_{-10}aE\cos\beta-\frac{E\Delta L\cos^2\beta}{l_1}\right)$$
$$=\frac{41780}{29.5^2}-\left(29.5-10\times19.6\times10^{-6}\times73000\times0.9912-\frac{73000\times0.1\times0.9912^2}{39}\right)=216.6$$

上面已知条件系数式中k_{aM}为最大允许应力的可能控制条件系数，其中最大者k_{amax}（安装过牵引），它必须小于或等于最小允许应力的k_{bmin}，即$k_{amax}\leqslant k_{bmin}$，否则应升高杆塔使$k_{bmin}$变大。本例中满足该项要求条件，且两者216.6<316.7差距较大，若需要时还可降低杆塔高度缩小k_{bmin}或放松最大允许应力增大k_{amax}使两者接近。本例中考虑到给定的最大允许应力太大，有条件可以放松。故取中间值k_m=250作为已知的有效控制条件，以此推求各控制条件下的应力均会满足要求。

4. 根据有效控制条件，推求已知可能控制条件下的实际使用应力

（1）求最高气温时的应力，由式（5-41）并代入已知有效控制条件k_m=250，及K_n=70650得

$$\sigma^2\left[\sigma+(250+aE\cos\beta t)\right]$$
$$=\sigma^2\left[\sigma+(250+19.6\times10^{-6}\times73000\times0.9912\times40)\right]$$
$$=70650$$
$$\sigma^2[\sigma+306.73]=70650$$

$\sigma=14.823\text{N/mm}^2$，大于最小允许的12.8N/mm²，使跨越间隙由4m增为4.11m。

（2）求覆冰时的应力，仿上可写为

$$\sigma^2\left[\sigma+(250+aE\cos\beta t)\right]=138481$$
$$\sigma^2\left[\sigma+(250+5\times19.6\times10^{-6}\times73000\times0.9912)\right]$$
$$=138481$$
$$\sigma^2[\sigma+242.91]=138481$$

$\sigma=22.83\text{N/mm}^2$，小于最大允许应力26.55 N/mm²。

（3）求安装过牵引时的应力，由式（5-42）可写为

$$\sigma^2\left[\sigma+\left(250+\alpha E\cos\beta t-\frac{E\Delta l\cos^2\beta}{l_1}\right)\right]=$$
$$\sigma^2\left[\sigma+\left(250-10\times19.6\times10^{-6}\times73000\times0.9912-\frac{73000\times0.1\times0.9912^2}{39}\right)\right]=41780$$

$\sigma^2[\sigma+51.92]=41780$，$\sigma=23.53$，小于最大容许应力29.5N/mm²。

5. 计算架线观测弧垂及应力

此情况一般均不带集中引下线荷载（待以后变电施工安装），且仅一端挂耐张串，另一端导线悬于滑轮上，计算应力时用K_{10}'。

（1）计算观测弧垂f_m的计算常数。由表5-23中算式写出

$$f_m=\frac{1}{\sigma_0'\cos\beta}\left[\frac{\gamma_1 l^2}{8}+\frac{(\gamma_{s1}-\gamma_1)\lambda_0^2}{4}+\frac{(\gamma_{s1}-\gamma_1)^2\lambda_0^4}{8\gamma_1 l^2}\right]$$
$$=\frac{1}{\sigma_0'\times0.9912}\times\left[\frac{0.03278}{8}\times45^2+\frac{(1.1695-0.0328)\times3^2}{4}+\frac{(1.1695-0.0328)^2\times3^4}{8\times0.03278\times45^2}\right]=\frac{11.15}{\sigma_0'}$$

（2）计算各气温下的观测弧垂时的应力σ_0'及弧垂f_m。由于导线张力很松，可不考虑导线“初伸长”引起的弧垂变化，其求解应力的方程按式（5-41）写为

$$\sigma_0'^2\left\{\sigma_0'+\left[\left(\frac{K_m}{\sigma_m^2}-\sigma_m'-\alpha E\cos\beta t_m\right)+\alpha E\cos\beta t\right]\right\}=K_{10}'$$

已知有效控制条件以$k_m=\frac{K_m}{\sigma_m^2}-\sigma_m'-\alpha E\cos\beta t_m=250$，则

$$\sigma_0'^2\left[\sigma_0'+(250+\alpha E\cos\beta t)\right]=22357,$$

令：$\alpha=250+\alpha E\cos\beta t=250+19.6\times10^{-6}\times73000\times t\times0.9912=250+1.4182t$

$$\sigma_0'^2\left[\sigma'+(250+1.4182t)\right]=22357$$

应力σ_0'及弧垂f_m'的计算结果列于表5-24中。

表 5-24　　孤立档架线观测应力及弧垂示例表

架线观测气温（℃）	40	20	0	−20	−40
α 值	306.73	278.36	250	221.64	193.27
导线观测弧垂时应力 σ_0'（N/mm²）	8.423	8.823	9.285	9.827	10.475
导线观测弧垂 f_m'（m）	1.32	1.26	1.20	1.13	1.06

6. 计算挂线后（竣工）的应力及弧垂

此情况一般均不带集中引下线（待以后变电施工安装），但两端均有耐张绝缘子串，计算应力时用 K_{10}。

（1）计算线路架线时的竣工弧垂 f_m 的计算常数，由表 5-23 中的算式写出：

$$f_m=\frac{1}{\sigma_0\cos\beta}\left[\frac{\gamma_1 l^2}{8}+\frac{(\gamma_{s1}-\gamma_1)\lambda_0^2}{2}\right]$$

$$=\frac{1}{\sigma_0\times0.9912}\times\left[\frac{0.03278\times45^2}{8}+\frac{(1.1695-0.0328)\times3^2}{2}\right]$$

$$=\frac{13.530}{\sigma_0}$$

（2）计算各气温下挂线竣工时的应力 σ_0 及弧垂 f_m。仿上面 5、（2）中的算例可列出解应力的方程为

$$\sigma_0^2\left[\sigma_0+(250+\alpha E\cos\beta t)\right]=K_{10}$$

令 $\alpha=250+\alpha E\cos\beta t=250+1.4182t$

则 $\sigma_0^2(\sigma_0+\alpha)=41780$

应力 σ_0 及弧垂 f_m 的计算结果列于表 5-25 中。

表 5-25　　孤立档挂线竣工应力及弧垂示例表

挂线竣工时的气温（℃）	40	20	0	−20	−40
α	306.73	278.36	250	221.64	193.27
导线挂线竣工后的应力 σ_0（N/mm²）	11.46	11.99	12.62	13.33	14.19
导线挂线竣工后的弧垂 f_m（m）	1.18	1.13	1.07	1.02	0.95

由于变电站进出线孤立档导线张力及档距很小且绝缘子串荷载影响很大，致使温度变化对应力弧垂变化的影响不大，当跨越间隙有较大裕度时，经过计算，也可以提出各气温下同一个较大的观测与竣工弧垂。

第四节　直线杆塔上电线纵向不平衡张力计算

当线路架线时，一般要求直线杆塔上不出现不平衡的水平张力。但当电线断线或气象条件改变时，由于档距、高差、荷载等的不同，均能产生不平衡张力。计算杆塔强度、验算电线不均匀覆冰（或不同期脱冰）、上人检修等情况下的线间电气间隙、检验邻档断线对被跨档内的交叉间距、检查转动横担或释放线夹是否能动作等均需计算这种纵向不平衡张力。

固定线夹的断线张力及纵向不平衡张力值选取部分内容见第八章第三节。

一、固定线夹断线张力的计算

除上述设计杆塔时规定的断线张力外，对重冰区线路、杆塔试验、邻档断线计算跨越档弧垂等，需要较为精确地计算静态断线张力，通常有图解法和公式计算法。

（一）图解法

用图解法计算断线张力时，根据精度要求档距可取各档相同或按实际的不等档距。靠近断线档附近的档距越大，剩余档数越多，断线张力越大（超过 5 档则影响不显著）。这里介绍普遍性的图解法，断线余档的档距布置如图 5-13，作图方法如下。

（1）绘制断线后各档档距变化与张力变化的关系曲线Ⅰ：$T=f(\Delta l)$；

当考虑电线弹性伸长时

$$T^2\left[T+\left(\frac{Eg^2l_0^2A}{24T_0^2}-T_0+\frac{E\Delta lA}{l_0}\right)\right]=\frac{AEg^2(l_0-\Delta l)^3}{24l_0}\tag{5-48}$$

或

$$\Delta l=\frac{l_0}{\left(1+\frac{g^2l_0^2}{8T^2}\right)}\left[\frac{g^2l_0^2}{24}\left(\frac{1}{T^2}-\frac{1}{T_0^2}\right)+\frac{T_0-T}{AE}\right]\tag{5-49}$$

式中 T ——档距由 l_0 变化为 $l_0-\Delta l$ 后的电线水平张力，N；

T_0 ——断线前档距为 l_0 下的已知电线水平张力，N；

l_0 ——断线前的档距，m；

g ——断线条件下的电线单位荷载，N/m；

E ——电线弹性系数，N/mm²；

Δl ——档距 l_0 的改变量，m，档距缩小取正值，增大取负值；

A ——电线截面积，mm²。

（2）绘制断线后各直线塔上电线悬挂点偏移与不平衡张力差的关系曲线Ⅱ

$$\delta=f(\Delta T)$$

$$\delta=\frac{\lambda\Delta T}{\sqrt{\left(G_c+\frac{G_s}{2}\right)^2+\Delta T^2}}+M\Delta T \qquad (5\text{-}50)$$

式中 δ ——直线塔电线悬挂点偏移距离（即悬垂绝缘子串下端悬垂线夹的水平偏移），m；

λ ——悬垂绝缘子串长度，m；

ΔT ——绝缘子串两侧电线水平张力差，N；

G_s ——悬垂绝缘子串重力荷载，N；

G_c ——直线塔上作用的电线荷载，N，当为等高等档距时 G_c 取 gl_0；

M ——柔性杆塔的挠度系数，m/N。

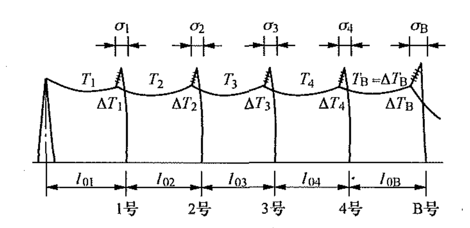
（3）图解断线张力步骤：将各档的 $T=f(\Delta l)$ 曲线Ⅰ与各直线杆塔的 $\delta=f(\Delta T)$ 曲线以 T 和 ΔT 为纵坐标，以 δ 和 Δl 为横坐标绘于同一张米格纸上（当档距、高差相同时，曲线Ⅰ、Ⅱ，各作一条）。

利用试凑法，先假定靠耐张塔一档的电线张力 T_1（见图 5-13），由 T_1 查曲线 Ⅰ_1 找出 Δl_1，因 $\Delta l_1=\delta_1$，由 δ_1 查曲线 Ⅱ_1 找出 ΔT_1，算出 $T_2=T_1-\Delta T_1$。

由 T_2 查曲线 Ⅰ_2 找出 Δl_2，算出 $\delta_2=\delta_1+\Delta l_2$，由 δ_2 查曲线 Ⅱ_2 找出 ΔT_2，算出 $T_3=T_2-\Delta T_2$。

如此继续下去由 T_i 查曲线 Ⅰ_i，算出 $\delta_i=\delta_{i-1}+\Delta l_i$，由 δ_i 查曲线 Ⅱ_i 找出 ΔT_i，算出 $T_{i+1}=T_i-\Delta T_i$。

直至算出相邻断线档的 T_B，由 T_B 查曲线 Ⅰ_B（即图 5-13 中曲线Ⅰ，下同）找出 Δl_B，算出 $\delta_B=\delta_{B-1}+\Delta l_B$，由 δ_B 查曲线 Ⅱ_B（即图 5-13 中曲线Ⅱ，下同）算出 ΔT_B。



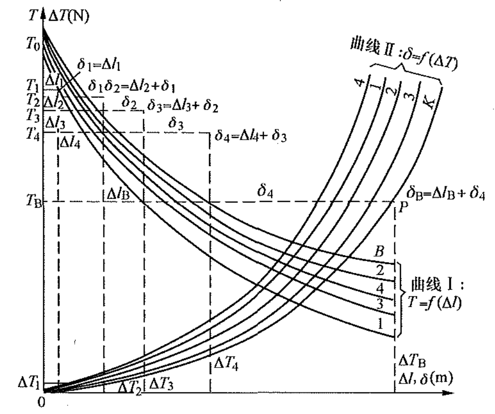


图 5-13 固定线夹断线张力图解法示意图

若 $T_B=\Delta T_B$（或者说 $\Delta l_B+\delta_{B-1}$ 的线段末端（P）正好落在 Ⅱ_B 曲线上)，则原假定为正确，T_B 即为所求的断线张力，否则应重新假定 T_1，重复上述步骤直至 $T_B=\Delta T_B$ 为止。

$T_B>\Delta T_B$（或者说 δ_B 线末端 P 点未达到 Ⅱ_B 曲线上）表明 T_1 设大了；若 $T_B<\Delta T_B$（或者说 δ_B 线末端 P 点超越过 Ⅱ_B 曲线）表明 T_1 设小了。

图解步骤简单顺序如下：

设 $T_1\rightarrow\Delta l_1\rightarrow\delta_1=0+\Delta l_1\rightarrow\Delta T_1\rightarrow T_2=T_1-\Delta T_1$

$T_2\rightarrow\Delta l_2\rightarrow\delta_2=\delta_1+\Delta l_2\rightarrow\Delta T_2\rightarrow T_3=T_2-\Delta T_2$

$T_3\rightarrow\Delta l_3\rightarrow\delta_3=\delta_2+\Delta l_3\rightarrow\Delta T_3\rightarrow T_4=T_3-\Delta T_3$

$T_4\rightarrow\Delta l_4\rightarrow\delta_3=\delta_3+\Delta l_4\rightarrow\Delta T_4\rightarrow T_5=T_4-\Delta T_4$

⋮

$T_B\rightarrow\Delta l_B\rightarrow\delta_B=\delta_{B-1}+\Delta l_B\rightarrow\Delta T_B\rightarrow T_{B+1}=$

$T_B-\Delta T_B=0$

【例 5-4】 断线张力图解的计算，见表 5-26 及图 5-14、表 5-27。

表 5-26　　　　断线张力图解曲线计算例题表

曲线计算公式：

Ⅰ. 曲线Ⅰ $\sigma = f(\Delta l)$

$$\sigma^2\left[\sigma + \left(\frac{E\gamma^2 l_0^2}{24\sigma_0^2} - \sigma_0 + \frac{E\Delta l}{l_0}\right)\right] = \frac{E\gamma^2 (l_0 - \Delta l)^3}{24 l_0}$$

式中　设　$a = \frac{E\gamma^2 l_0^2}{24\sigma_0^2} - \sigma_0 + \frac{E\Delta l}{l_0}$

$$b = \frac{E\gamma^2 (l_0 - \Delta l)^3}{24 l_0} \qquad B = \frac{E\gamma^2}{24} = 4.54$$

$$\frac{E\gamma^2}{24\sigma_0^2} = \frac{B}{\sigma_0^2} = 7.1\times10^{-4}$$

Ⅱ. 曲线Ⅱ $\delta = f(\Delta\sigma)$

$$\delta = \frac{\lambda\Delta\sigma}{\sqrt{\left(\gamma l_v + \frac{G_s}{2A}\right)^2 + \Delta\sigma^2}} + M\Delta\sigma = \frac{\lambda\Delta\sigma}{\sqrt{W^2 + \Delta\sigma^2}} + M\Delta\sigma$$

档号及档距 l_0	档距缩短量 Δl (m)	$l_0-\Delta l$ (m)	b (×10³)	$\frac{E\Delta l}{l_0}$	a	σ
1、3、5 400	0.2	399.8	726	42.5	76	70.4
	0.4	399.6	726	84.9	118.4	63.2
	0.6	399.4	724	127.3	160.8	57.6
	0.8	399.2	724	169.8	203.3	53.0
	1.0	399.0	722	212	245.5	49.5
	1.2	398.8	722	254.5	288	46.5
	1.4	398.6	722	297	330.5	43.9
	1.6	398.4	718	340	373.5	41.6
2、4 300	0.2	299.8	409	56.6	40.5	62.8
	0.4	299.6	409	113.2	91.7	52.3
	0.6	299.4	407	169.8	153.7	45.2
	0.8	299.2	407	226.4	210.3	40.3
	1.0	299.0	405	283	266.9	36.7
	1.2	298.8	405	339.6	323.5	33.6
	1.4	298.6	405	396.1	380.1	31.4
	1.6	298.4	403	452.8	436.7	29.4

数　据　表

直线塔编号	档距编号与档距 l		垂直档距 l_v (m)	γ_v	W	$\frac{B}{\sigma_0^2}l_0^2$	$\frac{Bl_0^2}{\sigma_0^2}-\sigma_0$	
1	1	400	400	14.32	15.8	113.5	33.5	
2	2	300	400	14.32	15.8	63.9	−16.1	
3	3	400	200	7.16	8.56	113.5	33.5	
4	4	300	400	14.32	15.8	63.9	−16.1	
5	5	400	200	7.16	8.56	113.5	33.5	
6	6							

电线比载 $\gamma\times10^{-2}$ [N/(m·mm²)]	断线前应力 σ_0 (N/mm²)	弹性系数 E (N/mm²)	悬垂串重力 G_s (N)	悬垂串长度 λ (m)	电线截面积 A (mm²)	$\frac{G_s}{2A}$	挠度系数 M $\left(\frac{\text{m}\cdot\text{mm}^2}{\text{N}}\right)$
3.58	80	84900	600	1.8	215.4	1.4	0

$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma^2$	直线塔编号	$W^2+\Delta\sigma^2$	$\sqrt{W^2+\Delta\sigma^2}$	$\frac{\lambda}{\sqrt{W^2+\Delta\sigma^2}}$	δ
1	1	3、5 1、2、4	74.6 251	8.63 15.85	0.2085 0.1135	0.2085 0.1135
5	25	3、5 1、2、4	98.6 275	9.93 16.6	0.1813 0.1085	0.907 0.543
10	100	3、5 1、2、4	173.6 350	13.18 18.7	0.1365 0.0963	1.365 0.963
15	225	3、5 1、2、4	298.6 459	17.3 21.4	0.104 0.0841	1.56 1.26
20	400	3、5 1、2、4	473.6 650	21.75 25.5	0.0827 0.0706	1.655 1.410
30	900	3、5 1、2、4	973.6 1150	31.2 33.9	0.0577 0.0531	1.73 1.593
50	2500	3、5 1、2、4	2574 2750	50.7 52.4	0.0355 0.0344	1.775 1.72
60	3600	3、5 1、2、4	3674 3850	60.5 62.0	0.0298 0.029	1.785 1.74

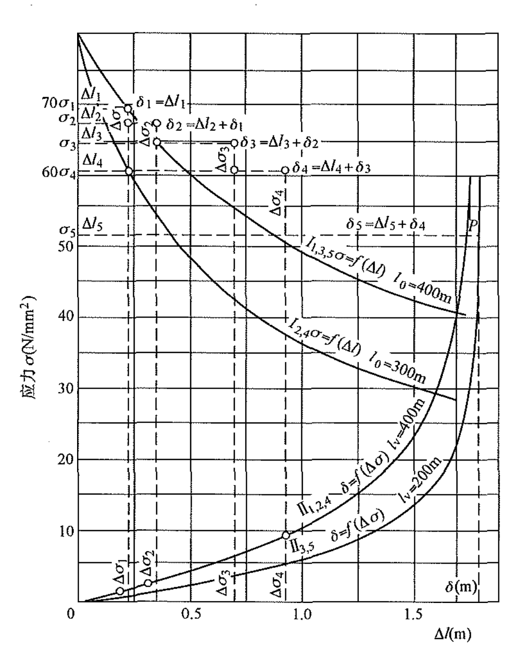


图 5-14 固定线夹断线应力图解法例题示意图

表 5-27 固定线夹断线应力图解法例题表

i	$\sigma_i=\sigma_{i-1}-\Delta\sigma_{i-1}$	Δl_i	$\delta_i=\Delta l_i+\delta_{i-1}$	$\Delta\sigma_i$
1	69.4	0.225	0.225	1.8
2	69.4–1.8=67.6	0.125	0.125+0.225=0.35	2.9
3	67.6–2.9=64.7	0.35	0.35+0.35=0.7	3.7
4	64.7–3.7=61	0.225	0.225+0.7=0.925	9.3
5	61–9.3=51.7	0.86	0.86+0.925=1.785	51.7

利用式（5-48）～式（5-50），借助电算试凑求解断线张力要比图解快捷得多，其试凑步骤与图解相似。

（二）公式计算法

1. 断线后剩余一档的情况

在计算中不考虑杆塔的挠度和绝缘子荷载的影响，其断线应力的公式为

$$\sigma^2\left[\sigma+\left(\frac{E\gamma^2 l_0^2\cos^3\beta}{24\sigma_0^2}-\sigma_0+\frac{E\lambda\cos^2\beta}{l_0}\right)\right]=\frac{E\gamma^2 l_0^2}{24}\cos^3\beta \tag{5-51}$$

当不考虑悬挂点高差及弹性伸长的影响时，则式（5-51）简化为

$$\sigma=\frac{\sigma_0}{\sqrt{1+\dfrac{24\sigma_0^2\lambda}{\gamma^2 l_0^3}}}=\sigma_0\cos\arctan\left(\frac{\sigma_0}{\gamma l_0}\sqrt{\frac{24\lambda}{l_0}}\right) \tag{5-52}$$

式中 σ_0、σ ——断线前后的电线应力，N/mm²；

l_0 ——剩余一档的档距，m；

E ——电线弹性系数，N/mm²；

λ ——悬垂绝缘子串的长度，m；

γ ——断线条件下的电线比载，N/（m · mm²）；

β ——剩余一档的电线悬挂点高差角，（°）。

2. 经验计算公式与经验曲线法

计算中不考虑电线的弹性伸长及杆塔的挠度并假定档距相等，高差为零，断线张力用下式表示

$$\left.\begin{aligned}T_B&=C_i\sigma_0 A=C_i T_0\\ \sigma_0&=\frac{T_0}{A}\end{aligned}\right\} \tag{5-53}$$

式中 C_i ——断线后电线应力（或张力）的衰减系数，i 为断线后剩下的档数；

σ_0 ——断线前的电线应力，N/mm²；

A ——电线截面积，mm²。

断线后电线应力衰减系数，按以下情况选取。

（1） 断线后剩下一档的情况。

$$C_1=\sqrt{\frac{\left(1-\dfrac{2.9\lambda}{l_0}\right)}{\left(1+\dfrac{23}{\left(\dfrac{\gamma l_0}{\sigma_0}\right)^2\left(\dfrac{l_0}{\lambda}\right)}\right)}} \tag{5-54}$$

式中 C_1 ——断线后剩下一档的电线应力（或张力）的衰减系数。

（2）断线后剩下 5 档及 5 档以上情况。

当 $\dfrac{\gamma l_0}{\sigma}>0.1$ 时

$$\left.\begin{aligned}&C_5^2(C_5-B)=A\\ &A=\left[0.0196\times\sqrt{\frac{l_0}{\lambda}}+0.224\right]\times\sqrt{\frac{l_0}{\lambda}}\left(\frac{\gamma l_0}{\sigma_0}\right)^2\\ &B=0.74-\frac{5.7}{\sqrt{\dfrac{l_0}{\lambda}}}-A\end{aligned}\right\} \tag{5-55}$$

式中 C_5 ——断线后剩下五档的电线应力（或张力）的衰减系数。

当 $\dfrac{\gamma l_0}{\sigma_0}\leqslant 0.1$ 时

$$C_5=D\sqrt{\frac{\gamma l_0}{\sigma_0}} \tag{5-56}$$

$$D^2(D-B)=A$$

$$A=0.0062\times\left(\frac{l_0}{\lambda}\right)+0.0708\times\sqrt{\frac{l_0}{\lambda}}$$

$$B=2.34\times\frac{18}{\sqrt{\frac{l_0}{\lambda}}}-0.1A$$

（3）断线后剩下2～4档的情况：

$$\left.\begin{aligned}C_2&=0.4C_1+0.6C_5\\C_3&=0.16C_1+0.84C_5\\C_4&=0.06C_1+0.94C_5\end{aligned}\right\}\qquad(5\text{-}57)$$

式中 C_1 用式（5-54）计算；C_5 根据 $\frac{\gamma l_0}{\sigma_0}$ 的大小采用式（5-55）或式（5-56）计算。为便于求得 $C_1\sim C_5$，也可按式（5-54）～式（5-57）或邵天晓编《架空送电线路的电线力学计算》中的精确公式求解以 $\frac{l_0}{\lambda}$ 为参变数，以 $\frac{l_0}{\sigma_0}$ 为变数的 C 值曲线族。

二、线路正常运行中的不平衡张力计算

电线架设时是保持连续档内各档水平应力相同的，但当运行中气温、外荷载及其他气象条件变化时，由于档距或高差不同或因各档外荷载不均匀（如冰、风）等，将引起各档应力不同，使直线杆塔出现不平衡张力。当线路为针式绝缘子时，这种不平衡张力往往很大。当线路为悬式绝缘子时，由于绝缘子串的偏移作用，将使不平衡张力大为减小。但在不利条件可能引起上下线间的间距不足或使释放线夹和转动横担发生误动作。对分裂导线的线路，直线杆塔设计不考虑断整相导线，仅规定直线杆塔承受一定程度的纵向不平衡张力，对这种线路以及大跨越和重冰区线路，需要检查由于档距、高差悬殊、覆冰不均匀等因素引起的不平衡张力。对覆冰的大跨越及重冰区线路，还要检查覆冰不均匀时导线间及导、地线间的电气间隙。

发生最大不平衡张力的情况一般是档距、高差相差悬殊，耐张段内一侧覆冰而另一侧少冰或无冰的交界杆塔处。发生上下导线或与地线相接近的情况，一般是在耐张段中间大档内下线无冰或少冰，其余全覆重冰。由于不平衡张力涉及的因素很多，难以详细概括叙述各变化因素间的组合关系。下面仅列出计算不平衡应力的普遍方程组，可根据工程中的具体条件和计算用途，选择适应的参数，借助电算试凑求解。另外，还列出计算最大不平衡张力的近似求解法。

（一）不平衡张力求解的近似方程组

1. 档距变化与应力间的近似关系

假定在耐张段内有几个连续档，架线后无冰、无风架线气温为 $t_{\rm m}$，导线初伸长尚未放出架线应力为 $\sigma_{\rm m}$ 时，各直线杆塔上悬垂绝缘子串均处于中垂位置，各档导线水平应力均为 $\sigma_{\rm m}$。当出现需要计算不平衡张力的气象条件时（如不均匀覆冰），各档应力不同，直线杆塔导线悬挂点发生偏移，档距发生变化。可近似列出第 i 档档距增量 Δl_i 与档内应力 σ_i 间的关系式为

$$\Delta l_i=\frac{l_i}{\cos^2\beta_i\left(1+\frac{\gamma_i^2l_i^2}{8\sigma_i^2}\right)}\times\left\{\frac{(l_i\cos\beta_i)^2}{24}\times\left[\left(\frac{\gamma_{\rm m}}{\sigma_{\rm m}}\right)^2-\left(\frac{\gamma_i}{\sigma_i}\right)^2\right]+\left(\frac{\sigma_i-\sigma_{\rm m}}{E\cos\beta_i}\right)+\alpha(t+\Delta t_{\rm e}-t_{\rm m})\right\}\qquad(5\text{-}58)$$

当第 i 档内在运行中上人检修或悬挂集中荷载时，其 Δl_i 与 σ_i 的关系式为

$$\Delta l_i=\frac{l_i}{\cos^2\beta_i\left(1+\frac{\gamma_i^2l_i^2}{8\sigma_i^2}\right)}\times\left\{\frac{(l_i\cos\beta_i)^2}{24}\times\left[\left(\frac{\gamma_{\rm m}}{\sigma_{\rm m}}\right)^2-\varepsilon_i\left(\frac{\gamma_i}{\sigma_i}\right)^2\right]+\left(\frac{\sigma_i-\sigma_{\rm m}}{E\cos\beta_i}\right)+\alpha(t+\Delta t_{\rm e}-t_{\rm m})\right\}\qquad(5\text{-}59)$$

$$\varepsilon_i=1+\frac{12\cos^2\beta_i}{\gamma_i^2l_i^4}\times\left[\sum_{j=1}^{j=n}q_ja_jb_j\left(\frac{\gamma_il_i}{\cos\beta_i}+q_j\right)+2\times\left(q_1a_1\sum_{j=2}^{j=n}q_jb_j+q_2a_2\times\sum_{j=3}^{j=n}q_jb_j+\cdots+a_{n-1}b_nq_{n-1}q_n\right)\right]\qquad(5\text{-}60)$$

式中 l_i、β_i——分别为耐张段内悬垂串处于中垂位置第 i 档的档距，m；高差角，(°)；

α、E——分别为导线的温度线膨胀系数，1/℃，弹性系数，N/mm²；

$t_{\rm m}$、$\sigma_{\rm m}$、$\Delta t_{\rm e}$、$\gamma_{\rm m}$——分别为导线架线时的气温，℃，相应气温下耐张段内的架线水平应力，N/mm²，架线时为考虑初伸长降低的等效温度（取正值），℃，架线时导线的自重力比载，N/(m·mm²)；

t、σ_i、γ_i、Δl_i——计算不平衡张力时的气温，℃，第 i 档的水平应力，N/mm²，比载，N/(m·mm²)，档距的增量（缩短时为负值），m；

ε_i——当计算不平衡张力时第 i 档内附加 n 个集中荷载所产生的系数；

q_j、a_j、b_j——第 i 档内第 j 个单位截面的集中荷载，N/mm²，a_j、b_j 为该荷载距档距左、右（或前、

后）端头的水平距离，m；

A ——导线截面积，mm^2。

2. 悬垂绝缘子串偏斜与两侧导线应力间的关系

由于待求情况下各档水平应力可能不同而在相邻档间悬垂串两侧出现不平衡水平张力差，使悬垂串产生偏斜，如图 5-15 所示。

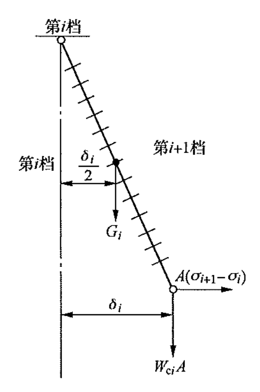


图 5-15 悬垂绝缘子串受力偏斜图

假定悬垂串为均布荷载的刚体直棒，第 i 基直线塔上悬垂串末端导线悬挂点的顺线路水平偏移 δ_i 与两侧导线应力差的关系为

$$\sigma_{i+1}=\sigma_i+\frac{\delta_i}{\sqrt{\lambda_i^2-\delta_i^2}}\left(\frac{G_i}{2A}+W_{ci}\right)$$

$$W_{ci}=\left(\frac{\gamma_i l_i}{2\cos\beta_i}+\frac{\sigma_i h_i}{l_i}\right)+\left(\frac{\gamma_{i+1} l_{i+1}}{2\cos\beta_{i+1}}-\frac{\sigma_{i+1} h_{i+1}}{l_{i+1}}\right)$$

上两式解出 σ_{i+1} 的显函数式为

$$\sigma_{i+1}=\left[\left(\frac{G_i}{2A}+\frac{\gamma_i l_i}{2\cos\beta_i}+\frac{\gamma_{i+1} l_{i+1}}{2\cos\beta_{i+1}}+\frac{\sigma_i h_i}{l_i}\right)+\frac{\sigma_i}{\delta_i}\sqrt{\lambda_i^2-\delta_i^2}\right]\div\left(\frac{\sqrt{\lambda_i^2-\delta_i^2}}{\delta_i}+\frac{h_{i+1}}{l_{i+1}}\right) \quad (5\text{-}61)$$

式中 σ_i、σ_{i+1} ——分别为第 i 及 $i+1$ 档内导线的水平应力，N/mm^2。

δ_i ——第 i 基直线杆塔上悬垂串导线悬挂点顺线路水平偏距，偏向大号侧为正值，反之为负值，m；$\delta_i=\Delta l_1+\Delta l_2+\cdots+\Delta l_i$。

λ_i、G_i ——第 i 基直线杆塔上悬垂串的串长，m 及荷载，N。

h_i、h_{i+1} ——悬垂串处于中垂位置时，第 i 基对第 $i-1$ 和第 $i+1$ 对第 i 基直线杆塔上导线悬挂点间的高差，m；大号比小号杆塔悬挂点高者 h 本身为正值，反之为负值。

β_i、β_{i+1} ——悬垂串处于中垂位置时，第 i 及 $i+1$ 档导线悬挂点间的高差角，（°），$\beta_i=\arctan\left(\frac{h_i}{l_i}\right)$。

l_i、l_{i+1} ——悬垂串处于中垂位置时，第 i 及 $i+1$ 档的档距（两端悬挂点间的水平距离），m。

A ——导线截面积，mm^2。

3. 各档档距增量间的关系

对于整个耐张段内，各档档距增量之和应为零，即第 n 基杆塔（耐张杆塔）上导线悬挂点的偏距应为零，即

$$\delta_n=\sum_1^n\Delta l_i=0 \quad (5\text{-}62)$$

4. 各档导线应力的求解步骤

耐张段内若有 n 档，则有 $n-1$ 基直线杆塔。利用式（5-58）可列出 n 个方程，利用式（5-61）可列出 $n-1$ 个方程，利用式（5-62）可列出一个方程，共列出 $2n$ 个方程。有 Δl、σ 共 $2n$ 个未知数是可以求出的。较为直接的求解方法是利用上述公式试凑求解，假设初始应力，按图 5-16 流程试凑求解各档应力，直至满足 $\delta_n=\delta_{n-1}+\Delta l_n=0$。

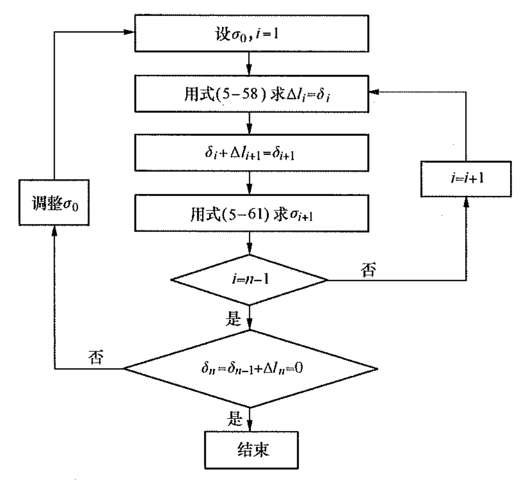


图 5-16 各档导线应力的求解流程

当第 i 档内有集中荷载时，计算 Δl_i 应换用式（5-59）。计算 σ_i 及 σ_{i+1} 时应换用式（5-63）、式（5-64）。

$$\sigma_i=\left[\left(\frac{G_{i-1}}{2A}+\frac{\gamma_{i-1}l_{i-1}}{2\cos\beta_{i-1}}+\frac{\gamma_i l_i}{2\cos\beta_i}+\frac{\sum q_j b_j}{l_i}+\frac{\sigma_{i-1}h_{i-1}}{l_{i-1}}\right)+\frac{\sigma_{i-1}}{\delta_{i-1}}\sqrt{\lambda_{i-1}^2-\delta_{i-1}^2}\right]\div\left(\frac{\sqrt{\lambda_{i-1}^2-\delta_{i-1}^2}}{\delta_{i-1}}+\frac{h_i}{l_i}\right) \quad (5\text{-}63)$$

$$\sigma_{i+1}=\left[\left(\frac{G_i}{2A}+\frac{\gamma_i l_i}{2\cos\beta_i}+\frac{\sum q_j a_j}{l_i}+\frac{\gamma_{i+1}l_{i+1}}{2\cos\beta_{i+1}}+\frac{\sigma_i h_i}{l_i}\right)+\frac{\sigma_i}{\delta_i}\sqrt{\lambda_i^2-\delta_i^2}\right]\div\left(\frac{\sqrt{\lambda_i^2-\delta_i^2}}{\delta_i}+\frac{h_{i+1}}{l_{i+1}}\right) \tag{5-64}$$

式中符号含义同式（5-60）、式（5-61）。

（二）覆冰不均匀条件下的最大不平衡张力计算通用曲线

当耐张段内有无限多个等高的等档距时，设耐张段中央某直线杆塔的一侧所有档距内导线覆有设计冰厚，而另一侧所有档距内均无冰或覆轻冰，则耐张段中央分界直线杆塔上的不平衡张力可用图5-17中的曲线近似的解出，其求解方法如下：

作直线 $y=a+mx$ 绘于图5-17中，与图中曲线 $y_n=\dfrac{x}{\sqrt{1-x_0^2}}-nx^2$ 交于已知参变数为 n 的曲线上，设其交点的对应横坐标为 x_0，由 x_0 查 $n=0$ 曲线上所对应的纵坐标 y_0，则覆冰不均匀分界直线杆塔上的不平衡张力即可按式（5-65）求出

$$\Delta T=\frac{x_0}{\sqrt{1-x_0^2}}\times G_0=y_0G_0 \tag{5-65}$$

参数 a、m、n 计算式为

$$a=(\sigma_1-\sigma_2)\frac{A}{G_0} \tag{5-66}$$

$$\left.\begin{aligned}m&=\frac{\lambda A}{G_0}(\sigma_1M_1+\sigma_2M_2)\\M&=\frac{1}{2d}-\sqrt{\left(\frac{1}{2d}\right)^2+\left(1+\frac{b}{2l}\right)/cd}\\b&=\frac{\gamma^2l^3}{4\sigma^2}\\d&=\frac{A\sigma\lambda}{G}\end{aligned}\right\} \tag{5-67}$$

$$\left.\begin{aligned}n&=\frac{\lambda^2A}{G_0}(\sigma_1N_1-\sigma_2N_2)\\N&=\left(\frac{b}{2c}\right)\frac{(1-dM)M^2}{(1-dM)-dM(2+cM)}\\c&=\frac{l\sigma}{E}+\frac{b}{3}\end{aligned}\right\} \tag{5-68}$$

式中 A——导线截面积，mm^2；

l——档距，m；

E——导线弹性系数，N/mm^2；

γ——导线比载，N/（m·mm²）；

λ——悬垂绝缘子串长度，m；

G_0——覆冰不同分界杆塔上的垂直荷载；

G——垂直荷载，N，按两侧覆冰大小计算，分别以 G_1、G_2 代表。

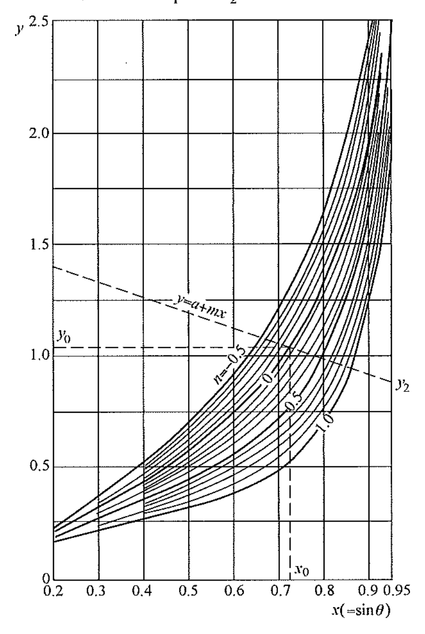


图5-17 覆冰不均匀不平衡张力计算曲线

$$\left.\begin{aligned}G_1&=\frac{G_s}{2}+Al\gamma_{3(100\%)}\\G_2&=\frac{G_s}{2}+Al\gamma_{3(x\%)}\\G_0&=\frac{G_s}{2}+\frac{Al}{2}(\gamma_{3(100\%)}+\gamma_{3(x\%)})\end{aligned}\right\} \tag{5-69}$$

式中 G_s——绝缘子串荷载，N；

σ——假想的导线初始应力（即覆冰不均匀时，假想悬垂绝缘子串均不产生偏斜，即各档假想互相孤立变化时的应力），N/mm^2。

以上各项应分别附加注脚“1”或“2”，以区别不同覆冰的左右侧，且应力大的一侧（即覆冰100%设计冰重），加注脚“1”，覆冰轻的一侧加脚注“2”，使 $\sigma_1>\sigma_2$，注脚“0”者为覆冰不同分界杆塔上的所属量。

【例5-5】 设一线路导线为JL/G1A-120，设计冰厚为20mm，耐张段内档距均为300m，在耐张段中央某分界直线杆的左侧档距均覆冰20mm，而右侧档距覆冰为设计冰重的25%，求分界直线杆塔上的悬垂绝缘子串偏角及不平衡张力。

解 （1）已知：

$A=137mm^2$ $E=85000N/mm^2$

$\lambda=1.625m$ $G_s=500N$

$\gamma_{3(100\%)}=19.4\times10^{-2}$

$$\gamma_{3(25\%)}=7.87\times10^{-2}$$

$$\sigma_1=112\text{N/mm}^2=\sigma_3\approx\sigma_7$$

$$\sigma_2=47.2\text{N/mm}^2=\sigma_{3(25\%)}$$

$$G_0=250+137\times\frac{300}{2}\times(7.87+19.4)\times10^{-2}=5855\text{（N）}$$

$$G_1=250+137\times300\times19.4\times10^{-2}=8230\text{（N）}$$

$$G_2=250+137\times300\times7.87\times10^{-2}=3500\text{（N）}$$

（2）参数计算：

$$a=\frac{A}{G_0}(\sigma_1-\sigma_2)=\frac{137}{5855}\times(112-47.2)=1.52$$

$$b_1=\frac{\gamma_7^2l^3}{4\sigma_1}=\frac{19.4^2\times300^3}{4\times112^2}\times10^{-4}=20.2$$

$$b_2=\frac{\gamma_{3(25\%)}^2l^3}{4\sigma_2}=\frac{7.84^2\times300^3}{4\times47.2}\times10^{-4}=18.8$$

$$C_1=\frac{l\sigma_1}{E}+\frac{b_1}{3}=\frac{300\times112}{85000}+\frac{20.2}{3}=7.14$$

$$C_2=\frac{l\sigma_2}{E}+\frac{b_2}{3}=\frac{300\times47.2}{85000}+\frac{18.8}{3}=6.43$$

$$d_1=\frac{A\sigma_1\lambda}{G_1}=\frac{137\times112\times1.63}{8230}=3.04$$

$$d_2=\frac{A\sigma_2\lambda}{G_2}=\frac{137\times47.2\times1.63}{3500}=3.01$$

$$M_1=\frac{1}{2d_1}-\sqrt{\left(\frac{1}{2d_1}\right)^2+\left(1+\frac{b_1}{2l}\right)\Big/c_1d_1}$$

$$=\frac{1}{2\times3.04}-\sqrt{\left(\frac{1}{2\times3.04}\right)^2+\left(1+\frac{20.2}{600}\right)\Big/7.14\times3.04}$$

$$=-0.11$$

$$M_2=\frac{1}{2\times3.01}-\sqrt{\left(\frac{1}{6.02}\right)^2+\left(1+\frac{18.8}{600}\right)\Big/6.43\times3.01}$$

$$=-0.118$$

$$m=(\sigma_1M_1+\sigma_2M_2)\frac{\lambda A}{G_0}=\frac{-137}{5855}\times1.63\times(112\times0.11+47.2\times0.118)=-0.681$$

$$N_1=\frac{b_1}{2c_1}\times\frac{(1-d_1M_1)M_1^2}{(1-d_1M_1)-d_1M_1(2+C_1M_1)}=\frac{20.2}{2\times7.14}\times\frac{(1+3.04\times0.11)\times0.11^2}{(1+3.04\times0.11)+3.04\times0.11\times(2-7.14\times0.11)}$$

$$=0.0131$$

$$N_2=\frac{18.8}{2\times6.43}\times\frac{(1+3.01\times0.118)\times0.118^2}{(1+3.01\times0.118)+3.01\times0.118\times(2-6.43\times0.118)}$$

$$=0.01535$$

$$n=\frac{\lambda^2A}{G_0}(N_1\sigma_1-N_2\sigma_2)$$

$$=\frac{1.63^2\times137}{5855}\times(0.0131\times112-0.01535\times47.2)$$

$$=0.046$$

（3）作直线 $y=a+mx$，并绘于图 5-17 中，$y=1.52-0.681x$

当 $x=0.2$ 时 $y_1=1.38$；当 $x=0.95$ 时 $y_2=0.873$。

（4）求解分界塔上之不平衡张力及悬垂绝缘子串偏角：

从图 5-17 中可查得直线与 $n=0.046$ 的曲线交点的横坐标 $x_0=\sin\theta_0=0.725$，则 y_0 值可自 $n=0$ 曲线上查得，当 $x=x_0$ 的纵坐标为 1.04，如要精确求解 y_0 值时，可用下式计算，即

$$y_0=\frac{x_0}{\sqrt{1-x_0^2}}=1.053$$

于是 $\Delta T=y_0G_0=1.053\times5855=6165\text{N}$

悬垂串的偏角为：$\theta=\arcsin0.725=46.5°$

由于曲线的假定条件为无穷多档，故计算结果一般皆偏大。

三、导线断线时地线支持力计算

当线路上一相导线折断时，杆塔沿线路方向倾斜。挂在杆顶地线的挂点亦发生偏移，因此相邻两档的地线产生了张力差。这张力差对杆塔起支持作用，这就是所要求的地线支持力。

设计钢筋混凝土电杆时，如果考虑断导线时地线支持力的作用，可减小杆塔的挠度和节省材料。但要保证地线悬垂线夹有足够的握着力，以免在断导线时，地线出现支持力引起地线在线夹中滑动而使支持力减小。因此，设计线夹握着力时要考虑地线可能出现的最大支持力；而设计杆塔时则要考虑断导线时可能出现的最小支持力。地线支持力的大小与耐张段内档距的数量、大小，断导线位置以及断导线引起各杆塔的挠度等因素有关。地线支持力的精确计算是很复杂的，如忽略非事故直线杆上导线不平衡张力所引起的杆顶挠度，则计算大为简化，因其计算结果误差甚小，故甚实用。

首先按有挠度情况求出导线断线张力，以作为计算地线支持力的基础。也就是不考虑导线及地线不平衡张力的相互影响，分别计算。下面就是已知导线断线张力后，只考虑地线各档张力的变化，以求地线支持力。

地线支持力各处不相同。如果耐张段很长，档距小，而导线断线档在耐张段中部，则地线支持力大。

如果耐张段短，档距大，断线档紧靠耐张塔，则地线支持力小。为计算地线较小的支持力，假定在 n 号杆和 $n+1$ 号杆（即靠耐张段一端）间档距中导线断线（见图 5-18），求地线对 n 号杆的支持力。

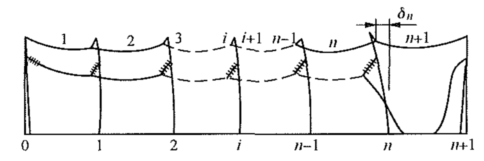


图 5-18 地线支持力在耐张段中产生情况示意图

（1）如地线支持力 ΔT_g 假定为已知，则可按下式计算 n 号杆上地线线夹的位移。

$$\delta_n = D_B T_B - D_g \Delta T_g - \frac{\lambda \Delta T_g}{\sqrt{\Delta T_g^2 + G_n^2}} \tag{5-70}$$

式中 δ_n —— n 号杆地线线夹的位移，偏向 0 号杆者为正，m；

λ ——地线悬垂串长，m；

T_B ——导线断线张力，N；

ΔT_g ——地线支持力，N；

G_n —— n 号杆上地线垂直荷载，N；

D_B ——断线张力作用下杆顶挠度系数，m/N；

D_g ——地线支持力作用下杆顶挠度系数，m/N；

$$D_B = \frac{K_c H_g^3}{3B_0}, D_g = \frac{K_g H_g^3}{3B_0};$$

H_g ——地线线夹电杆悬挂点到电杆根部的高度，m；

B_0 ——电杆根部固定处的刚度，N·m²；

K_g、K_c ——与作用力位置有关的系数，对等径杆 $K_g=1$，$K_c = \frac{3}{2}\left(\frac{H_c}{H_g}\right)^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{H_c}{H_g}\right)^3$，对拔梢杆须查曲线；

H_c ——导线悬垂绝缘子串电杆悬挂点到电杆根部的高度，m。

（2）算得 δ_n 后，下步求 n 到 $n+1$ 号杆间地线张力。如 $n+1$ 号杆为耐张杆，那么该档档距将伸长 $\Delta l_{n+1} = \delta_n$；如 $n+1$ 号为直线杆，且在长耐张段的中部，那么 $\Delta l_{n+1} = 2\delta_n$。然后按下式求该档地线张力。

$$T_{n+1}^2\left[T_{n+1} + \left(\frac{AEg^2 l_{n+1}^2}{24T_0^2} - T_0 - \frac{AE\Delta l_{n+1}}{l_{n+1}}\right)\right] = \frac{AEg^2 (l_{n+1} + \Delta l_{n+1})^3}{24 l_{n+1}} \tag{5-71}$$

式中 T_{n+1} ——第 $n+1$ 档地线事故后的张力，N；

A——地线截面积，mm²；

E——地线的弹性系数，N/mm²；

g ——地线单位长度重力荷载，N/m；

l_{n+1} ——第 $n+1$ 档档距长度，m；

T_0 ——断线前该耐张段代表档距下地线的张力，N。

在按上式计算前，应判断 Δl_{n+1} 之正负。如为负，则表示该档档距缩短，那就不会有地线支持力了，也就是 ΔT_g 假定过大，应减小后重新计算。

（3）第 n 档地线张力可由下式算得

$$T_n = T_{n+1} - \Delta T_g \tag{5-72}$$

算得 T_n 应为整个耐张段各档地线张力中最小者，当然也不会大于 T_0。故可由此计算出事故后第 n 档地线线夹间距离缩小值

$$\Delta l = \frac{l}{\left(1 + \frac{g^2 l^2}{8T^2}\right)} \times \left[\frac{g^2 l^2}{24}\left(\frac{1}{T^2} - \frac{1}{T_0^2}\right) + \frac{1}{AE}(T_0 - T)\right] \tag{5-73}$$

式中 Δl ——档端地线线夹间距离缩小值（正值），m；

l ——档距长度，m；

T ——事故后地线张力，N；

T_0 ——事故前地线张力，N。

上式适用于 1，2，3，…，n 各档。首先由第 n 档开始代入 T_n 求 Δl_n，然后递减。

（4）由下式可求得 $n-1$ 号（第 i 号）杆上地线线夹向 1 号杆的位移 δ_i：

$$\delta_i = \delta_{i+1} - \Delta l_{i+1} \tag{5-74}$$

式中符号含义同上述各式，i 适用于 1，2，…，$n-1$ 各杆。

（5）将 δ_i（δ_{n-1}）代入式（5-75），即可求得第 i 号（$n-1$ 号）杆上地线张力差 ΔT_i。

$$\delta_i = \frac{\lambda \Delta T_i}{\sqrt{\Delta T_i^2 + G_i^2}} + \Delta T_i D_g \tag{5-75}$$

上式右侧第二项为地线张力差产生的杆顶挠度，对拔梢杆而言，其影响甚大。

（6）求得 ΔT_i 后，即可由式（5-76）求得 T_i

$$T_i = T_{i+1} + \Delta T_i \tag{5-76}$$

式中下角 i=1，2，…，$n-1$。

然后依次得 T_i 代入式（5-73）、式（5-74）直至求得 $\delta_0 = 0$ 为止，即 0 号耐张塔上地线悬挂点不偏移。如不等于零，则应修正原假设支持力 ΔT_g，再从头算起，直到满足要求为止。此时的 ΔT_g 即为所求的地线支持力。求解流程见图 5-19。

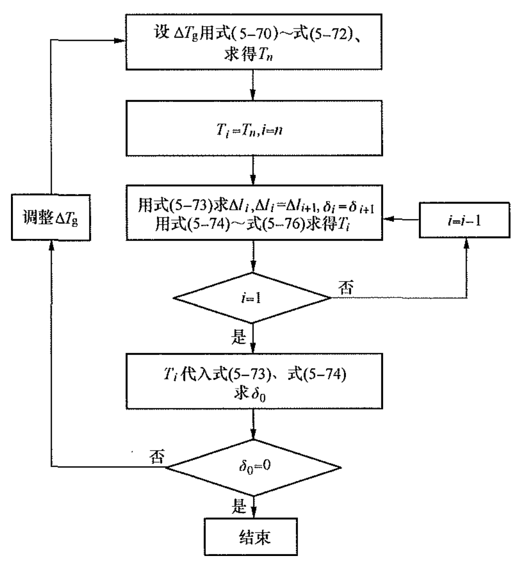


图 5-19 地线支持力求解流程图

第五节 施工弧垂计算、调整、观测、安装和验收

一、电线的初伸长及其处理

（一）初伸长的物理概念

当多股绞合电线受拉力后，除各股单线互相滑动、挤压使线股绞合得更紧而产生永久伸长外，随作用拉力的大小和持续时间的长短还产生所谓塑性伸长和蠕变伸长。前者的紧压伸长一般在架线观测过程中便能放出，后者中的一少部分在架线张力和其持续时间下也会放出，故对运行应力、弧垂无影响，而后者中的大部分塑性伸长和蠕变量则在线路投入运行初期的张力作用下才能逐渐放出，故常称初伸长。由于这种初伸长的放出，而增加了档内线长，引起弧垂增大（应力减小），以致使线路导线对地及对其他被跨越物的安全距离减小，所以在架线施工中必须考虑补偿。

为了更清楚地说明初伸长的概念，在图 5-20 中划出了电线应变特性曲线的示意图及初伸长的发展过程。当电线初受拉力时，应力与伸长关系沿着 0eMy 曲线变化（ε 为单位伸长）。0a_0 称为线股收紧的永久伸长。0any 段系初始应变线，其直线段的斜率为初始弹性系数 E_c。

当电线架线开始受拉时，伸长沿着初始应变线 0ae 变化，观测弧垂应力往返于 σ_e 以下时，应变则另沿 ee_0 应变线变化（相应的弹性系数为 $E_e>E_c$），a_0e_0 段便为架线时的塑性伸长（架线蠕变伸长未示出），这一塑性伸长和线股收紧伸长 0a_0 自然会在观测弧垂过程中予以排除。

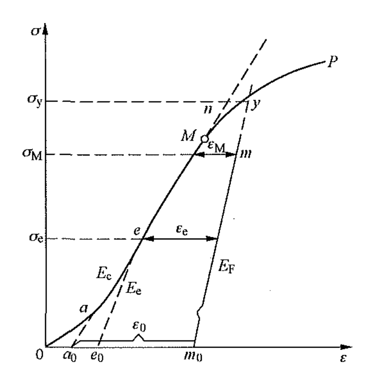


图 5-20 电线应变特性曲线示意图

当电线架设后，运行中若应力大于架线应力 σ_e，应变仍沿初始应变线 $eMny$ 线段上升。省略应力上升与下降往返过程的应变变化的叙述，简单地代之为应力升至最大使用应力 σ_M 时，若长时间地保持该应力，电线将产生蠕变伸长 ε_M（ε_M 随 σ_M 增大而略有增加），之后，应力变化时，应变将往返于 mm_0 应变线上（相应的斜率为运行弹性系数 E_F）。因而运行中电线共产生了 $\varepsilon_e=e_0m_0$ 长的塑性和蠕变伸长，简称为初伸长，需要在架线时加以排除或补偿。

（二）电线初伸长的处理方式

国际上对电线初伸长的处理一般有两种方式，IEC 标准对此进行了论述。

根据 IEC1597：1995-05）的规定，导线应力应变曲线取决于组合线股的弹塑性特性、几何缺陷和线股的金属蠕变。前两项参数相对于第三项参数来讲，不受时间的影响。由于导线应变与时间的相关性，应力—应变曲线总是以时间为基准。按照 IEC 的规定，导线应变可采用以下两种方式予以考虑：

第一种方式是使用两条应力—应变曲线来表达导线的特性。第一条曲线表示 1h 蠕变的初始曲线，第二条曲线表示 20℃时 10 年蠕变的最终曲线。

第二种方式是仅给出最终曲线，初始条件通过温度补偿得出。而且，有时提供一个单独的蠕变曲线，用来预测在任何时间之后的蠕变。我国在线路工程设计中即采用该种方式来考虑导线的蠕变。

（三）电线初伸长的实验及计算

蠕变是一个渐变过程。温度是由环境温度和工作温度构成的；而张力则主要是由导线自身的重力引起的。温度越高，张力越大，时间越长，蠕变伸长则越大。蠕变量的大小可以用蠕变方程近似测算，见式（5-77）。

$$\varepsilon_0=CT_\varepsilon^m \tag{5-77}$$

式中 ε_0 ——一定温度、张力和时间的蠕变量，mm/km；

T_ε ——蠕变周期，h；

C ——蠕变系数，是导线 1h 的蠕变量，由蠕变实验确定；

m ——蠕变指数，是蠕变与时间的对数曲线的斜率，由蠕变试验确定。

试验张力由标准规定导线极限拉断力（UTS）的百分数测算，而这个百分数则由申请实验者确定，一般在 15%～40%UTS 的范围内选定，尽量接近导线运行时的实际张力。表 5-28 及表 5-29 分别列出了我国一些常用架空导线及大截面导线的实验数据。从蠕变试验数据中可以看出，同一型号规格的导线的蠕变方程不同，蠕变量也有区别。

由表 5-28 及表 5-29 可以看出，表中特别列出了 10、20、30 年及 50 年的蠕变率。考虑到在线路的整个运行寿命周期，出现最大使用应力的小时数并不会很多。因此，在考虑导、地线长期运行后的塑性伸长时，多采用平均运行应力持续 10 年下的塑性伸长率作为设计标准。

表 5-28　　常用架空导线的蠕变实验数据

型号、规格	铝钢截面比	张力（%UTS）	蠕变率方程	蠕变量（mm/km）		
				10 年	20 年	30 年
JL/G1A-300/25	12.0	15（20℃）	$\varepsilon_0=40.5\,t_\varepsilon^{0.195}$	372	426	461
		20（20℃）	$\varepsilon_0=51.3\,t_\varepsilon^{0.193}$	461	527	570
JL/G1A-300/25	12.0	25（20℃）	$\varepsilon_0=60.9\,t_\varepsilon^{0.192}$	541	618	668
		30（20℃）	$\varepsilon_0=72.1\,t_\varepsilon^{0.193}$	648	741	801
		40（20℃）	$\varepsilon_0=89.4\,t_\varepsilon^{0.195}$	822	941	1019
JL/G1A-300/40	7.5	15（20℃）	$\varepsilon_0=37.8\,t_\varepsilon^{0.200}$	368	422	458
		20（20℃）	$\varepsilon_0=46.4\,t_\varepsilon^{0.206}$	484	558	606
		30（20℃）	$\varepsilon_0=56.2\,t_\varepsilon^{0.205}$	579	668	725
JL/G1A-400/35	11.4	15（20℃）	$\varepsilon_0=44.3\,t_\varepsilon^{0.200}$	431	495	537
		20（20℃）	$\varepsilon_0=56.9\,t_\varepsilon^{0.199}$	548	628	681
		25（20℃）	$\varepsilon_0=68.7\,t_\varepsilon^{0.201}$	677	777	843
		30（20℃）	$\varepsilon_0=79.5\,t_\varepsilon^{0.202}$	792	911	988
		40（20℃）	$\varepsilon_0=99.9\,t_\varepsilon^{0.200}$	973	1117	1211
JL/G1A-400/50	8.0	15（20℃）	$\varepsilon_0=38.3\,t_\varepsilon^{0.200}$	479	559	611
		20（20℃）	$\varepsilon_0=48.9\,t_\varepsilon^{0.199}$	546	632	689
		25（20℃）	$\varepsilon_0=58.2\,t_\varepsilon^{0.201}$	593	683	742
		30（20℃）	$\varepsilon_0=72.2\,t_\varepsilon^{0.202}$	728	837	909
		40（20℃）	$\varepsilon_0=96.0\,t_\varepsilon^{0.200}$	873	999	1080
JL/G1A-720/50	14.4	15（20℃）	$\varepsilon_0=18.5\,t_\varepsilon^{0.230}$	254	297	326
		20（20℃）	$\varepsilon_0=49.8\,t_\varepsilon^{0.186}$	415	470	507
		35（20℃）	$\varepsilon_0=67.7\,t_\varepsilon^{0.204}$	690	795	863

注　括号中为实验温度。

表 5-29　　JL/G3A-1000/45-72/7 导线的蠕变实验数据

样品厂家	铝钢截面比	张力（kN）	蠕变率方程	蠕变量（%）		
				10 年	30 年	50 年
厂家一	22.2	56.54（25%RTS）	$\varepsilon_0=0.0059\,t_\varepsilon^{0.2035}$	0.05979	0.07477	0.08296
厂家二	22.2	56.54（25%RTS）	$\varepsilon_0=0.0063\,t_\varepsilon^{0.1963}$	0.05882	0.07298	0.08068
厂家三	22.2	56.54（25%RTS）	$\varepsilon_0=0.0062\,t_\varepsilon^{0.1979}$	0.05895	0.07327	0.08107
厂家四	22.2	56.54（25%RTS）	$\varepsilon_0=0.0062\,t_\varepsilon^{0.1978}$	0.05889	0.07318	0.08096
厂家五	22.2	56.54（25%RTS）	$\varepsilon_0=0.0062\,t_\varepsilon^{0.2006}$	0.06079	0.07578	0.08396
厂家六	22.2	56.54（25%RTS）	$\varepsilon_0=0.0061\,t_\varepsilon^{0.2001}$	0.05947	0.07410	0.08207

注　t_ε—时间，h，导线结构为 72/4.21+7/2.80。

表 5-28 及表 5-29 所示导线的铝钢截面比分别为 7.8、8.0、11.4、12.0、14.4 及 22.2，基本覆盖了在工程中使用导线范围，可满足工程需要。

（四）电线初伸长的设计处理方法

（1）预拉法。电线的初伸长，随着应力的加大，可以缩短放出的时间，如图 5-20 所示，最大应力 σ_M 下的蠕变伸长 ε_M，可能需要数年才能发展完毕。但所加应力如大于最大设计应力时，完成时间可以缩短。若所加应力大到 σ_y，则瞬间便能将初伸长拉出。为此，可以在架线时预先加大拉力，将其初伸长拉出，使电线在架设初期就进入运行应变状态。预拉应力的大小、时间随电线最大使用应力的大小而定，对于钢芯铝绞线，列出表 5-30 中的预拉应力以供参考。

表 5-30　　钢芯铝绞线预拉应力与时间表　　min

电线安全系数	预拉应力为导线破坏应力的 60%所需的预拉时间	预拉应力为导线破坏应力的 70%所需的预拉时间
2.0	30	2
2.5	2	瞬间

（2）增加架线应力系数法。所谓系数法就是在架线施工时适当地减小电线的安装弧垂，以便当电线在运行中产生初伸长时，所增大的弧垂恰能补偿架线中所减小的弧垂，以达到原设计无初伸长存在时的弧垂要求。增加架线应力的方法有以下几种算法。

1）理论计算法。以电线实际的应变特性曲线为基础（见图 5-20），根据不同架线应力下的初伸长长度 ε_e 按式（5-78）计算架线应力 σ_e。

$$\sigma_e^2\left\{\sigma_e+\left[\frac{E_F\gamma_m^2l^2}{24\sigma_m^2}-\sigma_m+\alpha E_F\times(t_e-t_m)-E_F\varepsilon_e\right]\right\}=\frac{E_F\gamma_e^2l^2}{24} \tag{5-78}$$

式中　σ_e——考虑初伸长的架线应力，N/mm²；
E_F——最终运行期间电线弹性系数，N/mm²；
σ_m、γ_m、t_m——分别为最终运行期间已知情况下的电线应力，N/mm²，电线比载，N/（m·mm²），气温，℃；
l——档距，m；对连续档为代表档距 l_r，m；
α——电线温度线膨胀系数，1/℃；
ε_e——架线应力 σ_e 下的初伸长率，如图 5-20 所示，它随架线应力而变（$\sigma_e=0$ 时，$\varepsilon_e=\varepsilon_0=\overline{\alpha_0 m_0}$，当 $\sigma_e=\sigma_m$ 时，$\varepsilon_e=\varepsilon_m$）；
γ_e、t_e——分别为架线时的电线比载，N/（m·mm²）及架线时气温，℃。

现行设计规范对导线、地线架线时应考虑的初伸长率（塑性伸长率）规定为：导线、地线架设后的塑性伸长应按制造厂提供的数据或通过试验确定。如无资料，对镀锌钢绞线可采用 1×10⁻⁴；对钢芯铝绞线可采用表 5-31 中所列数值。

表 5-31　　钢芯铝绞线塑性伸长率 ε_e

铝钢截面比	塑性伸长
11.34～14.46	5×10^{-4}～6×10^{-4}
7.71～7.91	4×10^{-4}～5×10^{-4}
5.05～6.16	3×10^{-4}～4×10^{-4}
4.29～4.38	3×10^{-4}

这里需要指出，厂家或试验提供的往往是平均运行应力下持续 1000h 的塑性伸长率，需按式（5-77）近似放大 10 年的塑性伸长率 ε_e。考虑初伸长求架线应力时，$\varepsilon_e=\varepsilon_0-\overline{\alpha_0e_0}$，$\overline{\alpha_0e_0}$ 为架线过程中已拉出的塑性伸长，如图 5-20 所示。设架线应力为 σ_e，挂线

的受力时间为T_e，由表5-28及表5-29和式（5-77）可算出架线中拉出的塑性伸长率为$\overline{\alpha_0 e_0} = C_e T_e^m$。

2）恒定降温法。线路设计中，一般将式（5-78）中架线考虑的初伸长率ε_e用式（5-79）折算为等效温度Δt_e。

$$\Delta t_e = \frac{\varepsilon_e}{\alpha} \tag{5-79}$$

式中 Δt_e——计算架线应力考虑补偿初伸长的等效温度，℃

ε_e——架线应力σ_e下的初伸长率（塑性伸长率）；

α——导、地线的温度线膨胀系数，1/℃。

将式中的$\varepsilon_e = \alpha\Delta t_e$代入式（5-78）中，便得到式（5-80），即

$$\sigma_e^2\left\{\sigma_e + \left[\frac{E_F\gamma_m^2 l^2}{24\sigma_m^2} - \sigma_m + \alpha E_F \times (t_e - \Delta t_e - t_m)\right]\right\} = \frac{E_F\gamma_e^2 l^2}{24} \tag{5-80}$$

对于钢芯铝绞线α一般在20×10^{-6}/℃左右；钢绞线在11×10^{-6}/℃左右。据此将表5-31中规定的ε_e折算为$\alpha\Delta t_e$，其中Δt_e即现行设计规范及工程中所规定及采用的降温值，见表5-32及表5-33。所谓采用降温法补偿初伸长对弧垂的影响，即在计算架线应力的式（5-80）中计入“$-\Delta t_e$”的缘故，使某一架线气温t_e下的架线应力高于该气温长期运行后的应力。

表5-32 钢芯铝绞线及镀锌钢绞线架线降温值Δt_e

线别	铝钢截面比	降温值（℃）
钢芯铝绞线	4.29～4.38	15
	5.05～6.16	15～20
	7.71～7.91	20～25
	11.34～14.46	25（或根据试验数据确定）
镀锌钢绞线		10

表5-33 大截面绞线架线降温值Δt_e

绞线型号	降温值（℃）（或根据试验数据确定）
JL1/G3A-1250/70	30
JL1/G2A-1250/100	30
JLHA1/G2A-1250/100	30
JLHA4/G2A-1250/100	30
JL1/G3A-1000/45	30
JL1/G2A-1000/80	30
JL1/G3A-900/40	25
JL1/G2A-900/75	25

二、架线弧垂及弧垂曲线

所谓架线弧垂系指各架线气温下档距中的最大弧垂点的弧垂，这里仅指档距内无耐张绝缘子串和集中荷载的情况（有集中荷载者见第三节中的孤立档计算）。在计算架线弧垂之前应先按本段中所述的方法计算各代表档距下的架线应力（计算例题见表5-34），然后根据观测档的档距、高差、应力等不同，选用适当的公式计算架线弧垂。

（一）架线弧垂曲线计算与绘图

由于一条线路中往往都有很多个不同代表档距的耐张段，且档距、高差等各异，故不宜一一分别选定其观测档单独进行架线应力弧垂计算。为方便起见，一般均以代表档距和架线气温为变数，计入为补偿塑性伸长需降低的温度Δt_e，不计高差影响，计算架线应力及档距为100m时的弧垂。其计算与绘图见表5-34及图5-21的例题，绘制各代表档距为100m档距的观测弧垂，这不仅能放大绘图比例，且便于不同观测档的弧垂换算。在实际架线使用时，可先根据耐张段的代表档距查出与观测气温相对应的f_{100}，然后根据观测档的高差、档距等用f_{100}换算出观测档的架线弧垂。

（二）架线观测档弧垂的计算

由于连续架线弧垂曲线中仅绘出代表档距下、100m档距内的弧垂f_{100}，依此按下面公式换算出档距为l时的观测弧垂f。

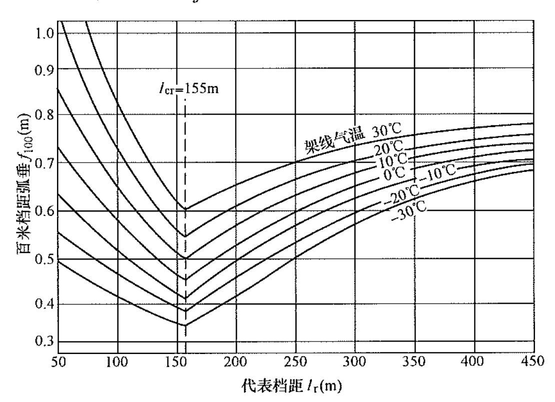


图5-21 GJ-35地线架线弧垂曲线例题图

注：本架线曲线中已考虑了电线的初伸长而减小了架线弧垂，减小弧垂值相当于降温7℃。

（1）对于悬挂点等高且弧垂较小时，观测档的架线弧垂f为

$$\left.\begin{aligned} f &= \frac{\gamma l^2}{8\sigma_r} = f_{100}\left(\frac{l}{100}\right)^2 \\ f_{100} &= \frac{\gamma\times100^2}{8\sigma_r} \end{aligned}\right\} \tag{5-81}$$

式中 f——观测档弧垂，m；

l ——观测弧垂档的档距，m；

γ ——电线自重力比载，N/（m·mm²）；

σ_r ——观测档的代表档距的架线应力，N/mm²；

f_{100} ——档距为 100m 时的观测弧垂，m。

（2）对悬挂点等高，但 $f/l>0.1$ 的大档距，观测档的架线弧垂 f 和悬挂点不等高且高差角 $\beta>8.5°$（或 $h/l>0.15$）时的架线弧垂 f 按下式计算。

当 $h=0$ 的大档距：

$$f=\frac{\sigma_r}{\gamma}\left(\text{ch}\frac{\gamma l}{2\sigma_r}-1\right)=\frac{100^2}{8f_{100}}\left(\text{ch}\frac{4lf_{100}}{100^2}-1\right) \tag{5-82}$$

当 $h/l>0.15$ 时的一般档距：

$$f=\frac{\gamma l^2}{8\sigma_r\cos\beta}=\frac{f_{100}}{\cos\beta}\left(\frac{l}{100}\right)^2 \tag{5-83}$$

当 $h/l>0.15$ 时的大档距 f 应按表 5-14 中悬链线公式的最大弧垂 f_m 计算，式中的 $\frac{\sigma_r}{\gamma}=\frac{100^2}{8f_{100}}$。

这里还需指出，杆塔定位模板宜用悬链线弧垂刻制，防止发生最大弧垂时对跨越物的间距不足。另外对连续上下山的档距，观测弧垂还要考虑弧垂调正。

【例 5-6】 地线架线应力弧垂计算示例见表 5-34 及图 5-21 中所示。其中已知条件为+15℃、无风、无冰下的地线应力，它一般是按本章第三节七、(一)、3 中地线应力的选定方法得出的，算例见【例 5-2】中的（5）项计算。对于导线的架线应力弧垂计算，其已知条件为各代表档距下的有效控制条件，详见本章第三节七、(二) 及【例 5-2】中所述。

三、连续上下山的架线观测弧垂及悬垂线夹的安装位置

架线施工时，首先将导线和地线悬挂在滑车中，待架线弧垂观测完毕后，再移设到悬垂线夹内。当电线挂于滑车中时，滑车两侧出口的电线张力必定保持相等，否则电线就要在滑车中滑动直至张力相等。因此，若耐张段中档距及悬挂点高度全相同时，则滑轮两侧的水平张力（或水平分力）均相等而滑轮处于垂直位置。这种情况下，要将电线从滑轮中移设在悬垂线夹内时，只需在电线接触滑轮中心点处装置悬垂线夹，悬垂绝缘子串就能保持垂直悬挂，并表明各档水平张力一致。若耐张段内档距或悬挂点高度不相等，特别是线路经过山区连续数档上山或下山，各杆塔悬挂点（Z_1～Z_3）的导线高度彼此悬殊（见图 5-22）。此时电线在滑车中虽两侧张力相等，但由于两侧电线悬垂角不一样而使其水平张力不同（滑轮产生偏斜）。其结果是电线最低点较低的档中水平张力较设计值小，弧垂较设计值大；最低点较高的档中水平张力（或应力）较设计值大，弧垂较设计值小。架线观测弧垂时应按电线在滑车中的弧垂值观测，待安装悬垂线夹时，按计算出的调正距离安装，这样才能使电线安装完毕后，各档水平应力相同，且弧垂与设计一致。连续上下山观测弧垂的调整及悬垂线夹安装位置计算方法如下：

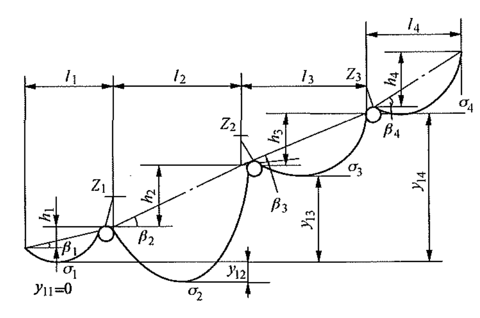


图 5-22 连续上下山电线在滑轮中的示意图

（一）电线在滑轮中各档的应力与弧垂计算

电线在滑轮中，任意两点间的应力差，等于两点间的高差与比载的乘积，据此得各档最低点的应力及架线弧垂，见式（5-84）。

$$\sigma_1=\sigma_0+\Delta\sigma_1=\sigma_0+\gamma_1(y_{11}-y_0)$$

$$\sigma_2=\sigma_0+\Delta\sigma_2=\sigma_0+\gamma_1(y_{12}-y_0)$$

$$\cdots$$

$$\sigma_K=\sigma_0+\Delta\sigma_K=\sigma_0+\gamma_1(y_{1K}-y_0)$$

$$y_0=\frac{\sum M_K y_{1K}}{\sum M_K}$$

$$M_K=\frac{\gamma_1^2 l_K^{\ 3}\cos\beta_K}{12\sigma_0^{\ 3}}+\frac{l_K}{E\cos^2\beta_K}$$

$$f_K=\frac{\gamma_1 l_K^{\ 2}}{8\sigma_K\cos\beta_K}=f_{0K}+\Delta f_K=f_{0K}\left(1-\frac{\Delta\sigma_K}{\sigma_K}\right)$$

$$f_{0K}=\frac{\gamma_1 l_K^{\ 2}}{8\sigma_0\cos\beta_K} \tag{5-84}$$

$$y_{1K}\approx f_{01}\left(1+\frac{h_{01}}{4f_{01}}\right)^2+h_{01K}-f_{0K}\left(1+\frac{h_{0K}}{4f_{0K}}\right)^2$$

式中 y_{1K} ——第 K 档电线最低点比第 1 档最低点高出的高度，m，即 $y_{1K}=y_K-y_1$，并取 $y_{11}=0$，y_{1K} 也可近似地在最大弧垂的定位断面图中量得或将架线情况下的弧垂画在断面图上量取；

h_{01K} ——第 K 基直线导线悬挂点对第 1 基直线塔导线悬挂点间的高差，m；K 悬点比 1 悬点高者为正值，反之为负值；

h_{01}、h_{0K} ——分别为第 1 和第 K 档两端导线悬挂点间的高差，m；后端（大号侧）比前端高者为正值，反之为负值；

γ_1 ——电线自重力比载，N/（m·mm²）；

σ_0 ——不考虑连续上下山影响的架线应力，N/mm²；可自架线弧垂曲线中查出估计

表 5-34　　　　GJ-35 架线应力弧垂曲线计算表

已知条件（最好取一种）

GJ-35 线的数据：

$\alpha=12.0\times10^{-6}$，$E=200000$，

$\alpha E=2.4$，计算公式：

$\sigma^2(\sigma+a)=b$，$f_{100}=\dfrac{\gamma}{8\sigma}\times 100^2$，$f=\dfrac{f_{100}l^2\times10^{-4}}{\cos\beta}$

式中 $a=Al_r^2-\sigma_m+\alpha E(t_e-\Delta t_e-t_m)$，$b=Bl_r^2$，$A=\dfrac{E\gamma_m^2}{24\sigma_m^2}=\dfrac{B_m}{\sigma_m^2}$，$B=\dfrac{E\gamma^2}{24}=54.2$，

$\Delta t_e=7$ ℃

条件 \ 数据	大气过电压
t_m（℃）	15
v_m（m/s）	0
δ_m（mm）	0
$\gamma_m\times10^{-2}$ [N/(m·mm²)]	8.065
σ_m (N/mm²)	下表
控制区间	全部
B_m	54.2

求出条件

条件 \ 数据	架线情况						
t_e（℃）	−30	−20	−10	0	10	20	30
v_e（m/s）	0	0	0	0	0	0	0
δ_e（mm）	0	0	0	0	0	0	0
$\gamma_e\times10^{-2}$ [N/(m·mm²)]	8.065	8.065	8.065	8.065	8.065	8.065	8.065
降温 Δt_e（℃）	+7.0	+7.0	+7.0	+7.0	+7.0	+7.0	+7.0
$t_e-\Delta t_e-t_m$	−52	−42	−32	−22	−12	−2	8
$\alpha E\times(t_e-\Delta t_e-t_m)$	−124.8	−100.8	−76.8	−52.8	−28.8	−4.8	19.2

数据 \ 架线气温（℃）						−30			−20			−10			0			10			20			30		
l_r	$A\times10^{-3}$	Al_r^2	σ_m	$A\times l_r^2-\sigma_m$	$Bl_r^2\times10^3$	α	σ	f_{100}	α	σ	f_{100}	α	σ	f_{100}	α	σ	f_{100}	α	σ	f_{100}	α	σ	f_{100}	α	σ	f_{100}
50	6.05	15.1	94.5	−79.4	135.5	−204.2	207.4	0.486	−180.2	184.2	0.547	−156.2	161.4	0.625	−132.2	139.2	0.725	−108.2	118	0.855	−84.2	98.2	1.027	−60.2	80.9	1.248
100	2.90	29	136.8	−107.8	542	−232.6	241.9	0.417	−208.6	219.8	0.460	−184.6	198.4	0.508	−160.6	177.8	0.567	−136.6	158.3	0.637	−112.6	140	0.72	−88.6	124	0.814
155	1.63	39	182.5	−143.5	1300	−268.3	284.4	0.354	−244.3	263.1	0.338	−220.3	242.5	0.416	−196.3	222.6	0.453	−172.3	203.7	0.495	−148.3	186	0.542	−124.3	169.6	0.595
200	2.12	84.8	160	−75.2	2170	−200	238.3	0.423	−176	220.6	0.457	−152	204.1	0.494	−128	189	0.534	−104	175	0.576	−80	162.4	0.621	−56	151.1	0.667
250	2.45	153.2	148.7	4.5	3390	−120.3	202.8	0.497	−96.3	190	0.531	−72.3	178.6	0.565	−48.3	168.3	0.600	−24.3	158.8	0.635	−0.3	150.3	0.67	23.7	412.8	0.706
300	2.75	245	141	104	4880	−20.8	176.8	0.57	3.2	168.6	0.598	27.2	161	0.626	51.2	154	0.655	75.2	148	0.681	99.2	142.2	0.709	123.2	137	0.736
350	2.86	350	137.7	212.3	6640	87.5	162.8	0.62	111.5	157.3	0.641	135.5	152	0.664	159.5	147	0.685	183.5	142.6	0.707	207.5	138.5	0.728	231.5	134.5	0.756
400	3.00	480	134.3	235.7	8660	220.9	152.5	0.661	244.9	148.5	0.68	268.9	144.8	0.696	292.9	141.3	0.714	317	138	0.73	341	135	0.747	365	132	0.764
450	3.02	611	134	477	10980	352.2	147.8	0.683	376.2	144.8	0.697	400.2	142	0.71	424.2	139.2	0.725	448.2	136.7	0.739	472.2	134.5	0.750	496.2	131	0.769

架线气温下的 f_{100}，即得 $\sigma_0=\dfrac{\gamma_1}{8f_{100}}\times10^4$；

l_K、β_K ——分别为第 K 档的档距，m；高差角，(°)；

E ——电线弹性系数，N/mm²；

σ_K ——电线在滑轮中观测弧垂时第 K 档实际水平应力，N/mm²；

f_{0K} ——不考虑连续上下山影响的第 K 档架线弧垂，m；可自架线弧垂曲线中查 f_{100}，用 $f_{0K}=\dfrac{f_{100}}{\cos\beta_K}\times\left(\dfrac{l_K}{100}\right)^2$ 换算或用 σ_0 代入 f_{0K} 的公式中计算；

f_K ——电线在滑车中，第 K 档的实际弧垂，m；即考虑连续上下山影响的架线弧垂；

Δf_K ——电线在滑车中，考虑连续上下山影响的架线观测弧垂调整量，m；$\Delta f_K=f_K-f_{0K}$。

目前很多工程采用机械化放线和紧线，为方便起见，紧线段常常跨耐张段。即式（5-84）中 σ_0 在各档中就不一定相同，它随不同耐张段的代表档距而变，今以 σ_{0i} 代之。此时将该式改写为

设 $$\sigma_K=\gamma_1(y_K-y_0)$$

式中 y_K ——第 K 档电线最低点标高，m。

很明显上式中 y_0 与式（5-84）中的 y_0 是不同的，但含义是相同的。故得

$$\left.\begin{aligned}\Delta\sigma_K=\sigma_K-\sigma_{0i}=(\gamma_1y_K-\sigma_{0i})-\gamma_1y_0=\gamma_1(y_{Ki}-y_0)\\ y_{Ki}=y_K-\frac{\sigma_{Oi}}{\gamma_1}\\ y_0=\frac{\sum M_Ky_{Ki}}{\sum M_K}\\ \Delta l_K=-M_K\Delta\sigma_K\end{aligned}\right\}\quad(5\text{-}85)$$

式中 Δl_K ——第 K 档导线多余的长度。

（二）悬垂线夹安装位置的调整

当电线在滑轮中观测弧垂后，耐张塔上挂线完毕，但直线杆塔上电线仍在滑轮中。在安装悬垂线夹之前，需进行悬垂线夹安装位置调整的划印工作（同一紧线段内必须全部划印完毕才能安装线夹），以保证架线完毕后各档应力相同（悬垂绝缘子串处于垂直）且符合设计值。所谓调整即装线夹时将低应力档的线长向高应力档串动（如一般向山上档移线）。调整长度 L_K 按式（5-86）计算。

线长调整的划印工作，参看图 5-23 中所示，首先，自滑轮与导线的接触点 A 量得至直线塔横担上绝缘子串悬挂点中垂线间的导线悬点水平偏距 δ_K，然后自 A 点沿导线向悬垂串中垂线方向量取 δ_K 至线上 B 点。B 点为丈量 L_K 的起点，当 L_K 为正值时应向 K 值减少的方向（即第 $K-1$ 基塔）量 L_K；反之向 K 值增加方向量 L_K。终点 C 即安装线夹中心点位置。

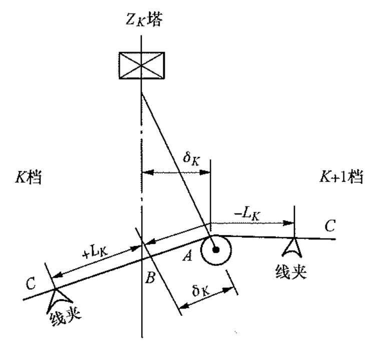


图 5-23 悬垂线夹安装位置的调整

$$L_1=-\Delta\sigma_1M_1$$

$$L_2=-(\Delta\sigma_1M_1+\Delta\sigma_2M_2)$$

$$\vdots$$

$$L_K=-\sum_1^K\Delta\sigma M=L_{K-1}-\Delta\sigma_KM_K\qquad(5\text{-}86)$$

连续上下山档的架线观测弧垂及悬垂线夹安装位置，可用表 5-35 的计算。仅用该表做了例题，即【例 5-7】，供参考。

【例 5-7】 连续上下山档的架线观测弧垂及线夹安装位置的计算见表 5-35。

四、电线弧垂的观测方法

线路在施工架线和运行中都会碰到观测电线弧垂的工作。观测弧垂的方法很多（详见表 5-36），可以根据观测档的现场条件和测量工具不同选用适当的方法。为提高测量精度，还需要恰当地选择观测档与观测点。

（一）弧垂观测档的选择原则

（1）选取连续档中的档距最大或较大者。

（2）选取高差较小的平坦地带。

（3）当连续档在⑤档及其以下者，至少选一靠近中间的大档距观测；当在⑥～⑫档时，至少各选一靠近两端的大档距观测（但不宜选在邻耐张杆塔之档距内）；当在⑫档以上时，在耐张段两端及中间至少各选一大档进行弧垂观测，以保证连续档的弧垂一致性。

（二）弧垂观测点的选择

为保证观测精度，弧垂观测点即观测视线与电线的相切点，应尽量设法切在弧垂最大处或附近（一般在档距中央）。当利用仪器观测时，切点仰角或俯角不宜过大，以保证弧垂有微小改变亦能引起仪器读数的明显变化，一般限制在 10° 以下，且视角还应尽量接近高差角。

另外，观测档的档距、悬挂点高差等有关涉及弧垂观测的数据，必须按照施工测量精度进行测量和核查。观测档的弧垂应计入考虑初伸长及连续上下山和气温变化引起的弧垂变化。

（三）弧垂观测方法

弧垂观测方法列于表 5-36 中。

表 5-35　　　　连续上下山档距的架线观测弧垂及线夹安装位置数据表

解　1. 计算段原始数据

耐张段：1 号至 7 号

代表档距：518m；

导线型号：JL/G1A-185

导线比载：$\gamma_1 = 3.58\times10^{-2}$ N/（m • mm²）；

导线弹性模量 E = 84900 N/mm²；

架线气温（代表值）t = −15℃；

架线应力（代表值）$\sigma_0 = 68.5$ N/mm²；

$$K_0 = \frac{\gamma_1}{8\sigma_0} = 0.654\times10^{-4}$$

$$\frac{\gamma_1^2}{12\sigma_0^3} = 0.00332\times10^{-7}$$

2. 计算公式

$$y_0 = \frac{\sum M_K y_{1K}}{\sum M_K}$$

$$\sigma_1 = \sigma_0 - \gamma_1 y_0 ,\quad \sigma_K = \sigma_0 + \Delta\sigma_K$$

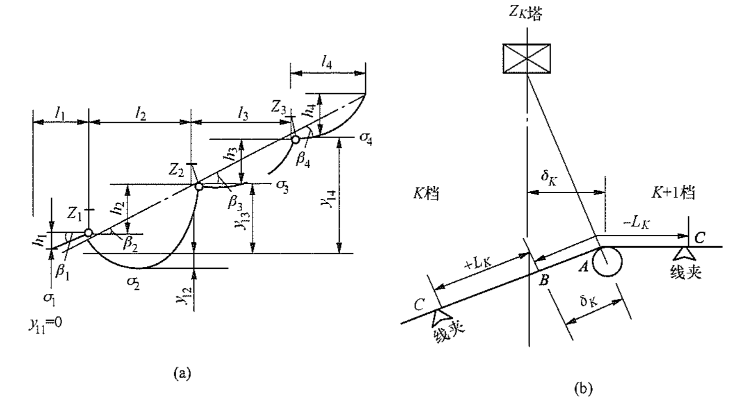
$$\Delta L_K = -\Delta\sigma_K \times M_K ,\quad L_K = \Delta L_K + L_{K-1}$$

$$M_K = \frac{\gamma_1^2 l_K^3 \cos\beta_K}{12\sigma_0^3} + \frac{l_K}{E\cos^2\beta_K} ,$$

$$f_K = \frac{\gamma_1 l_K^2}{8\sigma_K \cos\beta_K} = f_{0K} + \Delta f_K = f_{0K}\left(1 - \frac{\Delta\sigma_K}{\sigma_0}\right)$$

校核条件 $\sum \Delta L_K = 0$

连续上下山档距的架线观测弧垂及线夹安装位置数据见下表，表中 1/K 标高系假设标高系统。



连续上下山档的架线观测弧垂及线夹安装位置计算示意图

（a）连续上下山档示意图；（b）线夹安装位置示意图

数据 \ 计算编号									①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	调线塔号	⑪
档距两端塔号	l_K 档距（m）	h_K 高差（m）	h_K/l_K（$\tan\beta_K$）	y_K 电线最低点标高（m）	y_{1K}（$y_K - y_1$）	β_K（°）	$\cos\beta_K$	l_K^3（×10⁶，m³）	$\frac{\gamma_1^2 l_K^3\cos\beta_K}{12\sigma_0^3}$	$\frac{l_K}{E\cos^2\beta_K}$	M_K = ①+②	$y_{1K}\cdot M_k$	$y_{1K} - y_0$	$\Delta\sigma_K = \gamma_1\times$⑤	$f_{0K} = \frac{k_0}{\cos\beta_K}\times l_K^2$	$\Delta f_K \approx -\left(\frac{\Delta\sigma_K}{\sigma_0}\right)\times f_{0K}$	$f_K = f_{0K} + \Delta f_K$	$\Delta L_K = -\Delta\sigma_K\cdot M_K$	塔号	$L_K = \Delta L_K + L_{K-1}$
1～2	250	+25	0.1	2.5	0	5.7	0.995	15.62	0.00516	0.00298	0.00814	0	−87.7	−3.14	4.1	0.188	1.288	+0.0256	2	+0.026
2～3	700	+35	0.05	0	−2.5	2.9	0.999	343.0	0.1138	0.00827	0.12207	−0.306	−90.2	−3.23	32.0	+1.51	33.51	+0.3940	3	+0.420
3～4	300	+49.5	0.165	60.0	+57.5	9.4	0.987	27.0	0.00884	0.00363	0.01247	+0.717	−30.2	−1.08	5.95	0.0938	6.041	+0.0135	4	+0.433
4～5	300	+63	0.21	105.0	+102.5	11.9	0.979	27.0	0.00876	0.00369	0.01245	+1.275	+14.8	+0.53	6.0	−0.0464	5.954	−0.0066	5	+0.426
5～6	300	+63	0.21	167.5	+165.0	11.9	0.979	27.0	0.00876	0.00369	0.01245	+2.055	+77.3	+2.77	6.0	−0.2426	5.757	−0.0345	6	+0.392
6～7	600	+60	0.10	229.5	+227.0	5.7	0.995	216.0	0.0714	0.00714	0.07854	+17.84	+139.3	+4.99	23.6	−1.72	21.88	−0.3920		
											∑③=0.2461 ∑④=+21.58						校核条件 $\sum\Delta L_K = 0$			

表 5-36　　　　观 测 弧 垂 方 法 表

名称	图　例	测量方法与计算公式	使用说明
经纬仪测角法		（1）悬挂点下方测角法 低悬挂点： $\theta=\arctan\left(\frac{h}{l}+\frac{4\sqrt{fa}-4f}{l}\right)$ 高悬挂点： $\theta=\arctan\left(\frac{-h}{l}+\frac{4\sqrt{fb}-4f}{l}\right)$ （2）档外测角法 $\theta_1=\arctan\left(\frac{\pm h+a_1-(2\sqrt{f}-\sqrt{a_1-l_1\tan\theta_1})^2}{l+l_1}\right)$ 在低悬挂点侧 h 取正号；高侧取负号 （3）档内测角法 $\theta_2=\arctan\left(\frac{\pm h+a_2-(2\sqrt{f}-\sqrt{a_2+l_2\tan\theta_2})^2}{l-l_2}\right)$ 在低悬挂点侧 h 取正号；高侧取负号	该法应用范围广，但测量项目多且需较高的测量精度，一般应用于不能用样板法测量的档距。 使用档距法，观测角应接近高差角
等长样板法		（1）当塔高大于 f 且视线 $\overline{A_1B_1}$ 通视时，自电线悬挂点向下量 f 处设置彩色鲜明标志的样板，以目视或望远镜自样板 A_1 视向样板 B_1（或自 B_1 视向 A_1），电线与 $\overline{A_1B_1}$ 线相切时之弧垂即为 f，若弧垂 f 变化 Δf 时 A_1、B_1 可同时移动 Δf，或仅一端移动 $2\Delta f$ （2）当塔高小于 f 或 $\overline{A_1B_1}$ 线不通视时可在障碍物 C_1 点设样板，其位置与高度的关系为 $d=f-x\frac{h}{l}$	可广泛地应用于施工架线的弧垂观测中，该法测量简单，且切点在最大弧垂处，如果视线清晰，误差较小
不等长样板法		（1）当两塔高之和大于 2（$2f-\sqrt{ab}$），且 $\overline{A_1B_1}$ 线通视时，样板距悬挂点的距离为 $a=(2\sqrt{f}-\sqrt{b})^2$ $b=(2\sqrt{f}-\sqrt{a})^2$ （2）当档中有障碍物，$\overline{A_1B_1}$ 线不通视时，可在障碍物上设样板 C_1，其 C_1 的位置与高度的关系为 $d=a-\frac{x(h+a-b)}{l}$ （3）当 f 变化 Δf 时，若仅移动一侧的样板，则移动的距离 $\Delta b=2\Delta f\sqrt{\frac{b}{f}}$	应用于因地形，塔高等限制不能采用等长样板法的档距，更方便与检查电线弧垂，因可以先随意设置一端样板（样板自悬挂点下移距离要大于 0 小于 $4f$），在另一端设活动样板直至 $\overline{A_1B_1}$ 视线与电线相切，根据 a、b 值即可算出弧垂 f。 使用该法要注意 a、b 不宜相差太大
测档内线高法		$C=A+\frac{h}{2}-f$ $S=C-C_0$ $C_x=A+\frac{x}{l}\times\left[h-4f\left(1-\frac{x}{l}\right)\right]$ $S_x=C_x-C_{x0}$	该方法仅用于档内地形适于测量的档，测量项目多，要求精度高，故多采用仪器和标杆配合测量（运行中的线可以用绝缘杆量 S）。测任意点线高时，x 应尽量接近 $\frac{l}{2}$

注　表中 $f=\frac{\gamma_1 l^2}{8\sigma_r\cos\beta}=\frac{f_{100}}{\cos\beta}\times\left(\frac{l}{100}\right)^2$ 为档距中央的最大弧垂，m；连续上下山时，应计入弧垂调整量；

l——观测档的档距，m；σ_r——观测档的代表档距的电线应力，N/mm²；

γ_1——电线自重力比载，N/（m・mm²）；f_{100}——架线弧垂曲线中的 100m 档距的弧垂，m；

$\beta=\arctan\frac{h}{l}$ 为观测档距电线悬挂点高差角，（°）；h——观测档的电线悬挂点高差，m；

a、b——观测样板距悬挂点的垂直距离，m；A、B——电线悬挂点的假设标高，m；

C、C_x——档内电线测点的假设标高，m；C_0、C_{x0}——档内电线测点下方地面假设标高，m；

S、S_x——档内电线距地高度，m。

（四）改变弧垂方法

架线中有时采用放松张力下观测弧垂，挂线时再根据设计弧垂计算出多余的线长$\sum\Delta L$，将其截去，挂线后恰好满足要求。特别是运行中的线路，往往发现弧垂不符合要求需要拉紧或放松已架线之弧垂时，可根据已有的弧垂应力，计算出满足弧垂要求下需要收紧或放松的电线长度。将线长进行调整即能达到要求的弧垂，勿需再行观测弧垂。其计算公式如下

$$\sum\Delta l=\left(\sum\frac{l_i}{\cos^2\beta_i}\right)\left[\frac{\gamma_1^2 l_r^2\cos^3\beta_r}{24}\left(\frac{1}{\sigma_2^2}-\frac{1}{\sigma_1^2}\right)+\frac{\sigma_1-\sigma_2}{E}+\alpha\cos\beta_r(t_1-t_2)\right] \tag{5-87}$$

式中 $\sum\Delta l$——耐张段内需要补偿的线长，m，放松时为正值，收紧时为负值；

γ_1——电线自重力比载，N/（m·mm²）；

l_r——耐张段的代表档距，m；详见式（5-22）；

β_r——耐张段的代表高差角，（°），详见式（5-23）；

l_i、β_i——分别为第i档的档距，m；该档的高差角，（°）；

σ_1、σ_2——分别为未调整弧垂前和调整后的应力，N/mm²；

t_1、t_2——分别为未调整弧垂前和调整弧垂后相应于σ_1、σ_2下的气温，℃；

E——电线弹性系数，N/mm²。

五、装配架线计算方法

所谓装配架线法，即在室内外地面上直接量取档内所需要的电线长度标定线夹安装位置，依此悬挂电线勿需观测弧垂即可达到预定的竣工弧垂。在变电站软母线架线施工中已广泛采用这种装配架线法。对输电线路的进出线孤立档与变电站软母档基本相同，自然也可采用装配架线。至于线路上的长耐张段，由于丈量长线不便，装配架线不能普遍采用。如果电线在制造厂中像电缆线那样每50或100m就打印上长度标记（如日本电线厂就这样做过），线路上将会便于装配架线。采用这种方法架线，既免除了连续档内复杂而费工的弧垂观测和分段紧线等往返操作过程，又免除了连续倾斜档的弧垂与线长调整，减少施工工作量。但档距和高差等的测量精度要准确至毫米，这对目前采用的高精度测量仪器并不困难。

（一）连续档装配架线的无张力线长计算

1. 连续档耐张段内无耐张绝缘子串档内的无张力线长计算

$$\sum_2^{n-1}L_0=\sum_2^{n-1}L\left[1-\alpha(t_e-t_0)-(\varepsilon_\Sigma-\alpha\Delta t_e)\right]-\frac{\sigma_e}{2E}\sum_2^{n-1}\left[l+\left(\frac{L^2+h^2}{\sqrt{L^2+h^2}}\right)\mathrm{ch}\frac{\gamma_1 l}{2\sigma_e}\right] \tag{5-88}$$

$$L=\left[\left(\frac{2\sigma_e}{\gamma_1}\mathrm{sh}\frac{\gamma_1 l}{2\sigma_e}\right)^2+h^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{5-89}$$

2. 连续档两端第1及第n档内一端有耐张绝缘子串的无张力导线线长计算

$$L_{01}+L_{0n}=(L_1+L_n-2\lambda)\times\left[1-\alpha(t_e-t_0)-(\varepsilon_\Sigma-\alpha\Delta t_e)\right]-\frac{\sigma_e}{E}\left(\frac{L_1-\lambda}{\cos\beta_1}+\frac{L_2-\lambda}{\cos\beta_n}\right)-(D_1+D_2)A\sigma_e \tag{5-90}$$

$$L_i=\frac{l_i}{\cos\beta_i}+\frac{\gamma_1^2\cos\beta_i}{24\sigma_e^2}\left\{(l_i-\lambda\cos\beta_i)^2\times(l_i+2\lambda\cos\beta_i)+\frac{6G\lambda\cos^3\beta_i}{A\gamma_1^2}\times\left[\frac{(l-\lambda\cos\beta_i)\gamma_1}{\cos\beta_i}+\frac{2G}{3A}\right]-\frac{3\lambda^2\cos^4\beta_i}{\gamma_1^2 l}\times\left[\frac{(l-\lambda\cos\beta_i)\gamma_1}{\cos\beta_i}+\frac{G}{A}\right]^2\right\} \tag{5-91}$$

3. 连续档内无张力时的导线纯线长

$$\sum_1^n L_0=\sum_2^{n-1}L_0+L_{01}+L_{0n} \tag{5-92}$$

式中 l、l_i——分别为档内无耐张串和两端档一侧有耐张串的档距（算至耐张串挂孔，有转角时各相档距不同），m；

h——档距为l的两端悬挂点间高差，m；

β_i——两端第1或第n档两侧导线悬点间的高差角，（°）；

L、L_i——分别为档内无耐张串和两端档一侧有耐张串、架线气温为t_e时悬挂中的悬挂点间的弧线长，m；

L_0、L_{01}、L_{0n}——分别为档内无耐张串和两端档一侧有耐张串、无张力下丈量线长气温为t_0时的档内线长，m；

t_e、t_0——架线气温和丈量线长时的气温，℃；

γ_1、σ_e——分别为导线自重力比载，N/（m·mm²）；架线气温为t_e时已考虑初伸长降温Δt_e后的耐张段内代表档距下的架线应力，N/mm²；

α、A、E——分别为导线线膨胀系数，1/℃；单根导线截面，mm²；弹性系数，N/mm²；

D_1、D_n——两端耐张塔挂线后，两端导线悬挂点的挠度位移系数，m/N；

ε_Σ、$\alpha\Delta t_e$——分别为导线产生的总塑性伸长率（如图5-20中的$\overline{0m_0}$段，包括股间收紧的塑性伸长率）；架线考虑的塑

性伸长率，$\varepsilon_{\Sigma}=\alpha\Delta t_{e}$（见表 5-31、表 5-32）；两者之差即架线受张力时已拉出的塑性伸长率，如图 5-20 中的 $\overline{0e_0}$，可用一段出厂线 L_0 加架线应力 σ_e 受拉再放松后量得伸长量 Δl_e，$\overline{0e_0}=\dfrac{\Delta l_e}{L_0}$；

λ、G ——耐张段两端悬挂的耐张绝缘子串长度（算至导线截断处，逐串拉直精确丈量至毫米精度），m；耐张串分配到单根导线上的自重荷载，N。

（二）两端带等长等荷载耐张绝缘子串和集中引下线荷载的孤立档装配架线的无张力导线线长计算

$$L_0=(L-2\lambda)\left[1-\alpha(t_e-t_0)-(\varepsilon_{\Sigma}-\alpha\Delta t_e)-\frac{\sigma_e}{E\cos\beta}\right]-(D_1+D_2)A\sigma_e \tag{5-93}$$

$$L=\frac{l}{\cos\beta}+\frac{\gamma_1^2\cos\beta}{24\sigma_e^2}\left\{(l-2\lambda\cos\beta)^2(l+4\lambda\cos\beta)+\frac{12\cos^2\beta}{\gamma_1^2 l}\times\left[\frac{\lambda Gl\cos\beta}{A}\times\left[\frac{(l-2\lambda\cos\beta)\gamma_1}{\cos\beta}+\frac{2G}{3A}+\sum_1^n q\right]+\sum_1^n qab\left(\frac{l\gamma_1}{\cos\beta}+q\right)+2\left(a_1q_1\sum_2^n qb+a_2q_2\times\sum_3^n qb+\cdots+a_{n-1}q_{n-1}b_nq_n\right)\right]\right\} \tag{5-94}$$

式中 n ——档内集中荷载数量；

q ——单根导线上分配的单位截面上的某集中荷载，N/mm²；

a、b ——某集中荷载至左、右（或前、后）塔上导线悬挂点间的水平距离，m；

其他符号含义同式（5-90）、式（5-91）。

六、验收计算弧垂与检测弧垂的比较和处理

电线架设后，往往要经过一段时间后才进行架线弧垂的验收和核测。在这段滞后的时间内，电线在悬挂中应力的作用下，要产生塑性伸长使弧垂增大（设气温保持架线气温）。若欲判断架线弧垂是否正确，首先应该掌握架线中考虑的最终塑性伸长 ε_e（或 $\alpha\Delta t_e$），以及在架线后应力作用下短期时间内（如 10～1000h 间）所产生塑性伸长率的量值或占 ε_e 的百分数，便可依此计算验收弧垂的增量是否正确。表 5-28 及表 5-29 所列各型导线的蠕变试验数据和公式可满足工程设计、计算的需要。在取得检测弧垂时电线的塑性伸长率的数值后，即可按式（5-95）计算检测弧垂（即验收弧垂）时的电线应力大小。

1. 验收时的应力计算

$$\sigma_a^2\left\{\sigma_a+\left[\frac{E\gamma_1^2l_r^2}{24\sigma_e^2}-\sigma_e+\alpha E(t_a-t_e+\Delta t_a)\right]\right\}=\frac{E\gamma_1^2l_r^2}{24} \tag{5-95}$$

式中 σ_a、σ_e ——分别为验收弧垂时的代表档距下的应力和架线观测弧垂时已考虑塑性伸长降温 Δt_e 后的应力，N/mm²；σ_e 可通过架线百米档弧垂算出，即 $\sigma_e=\dfrac{\gamma_1\times100^2}{8f_{100}}$；

t_a、t_e ——分别为验收弧垂和观测弧垂时的气温，℃；

γ_1、α、E、l_r ——分别为导线自重力比载，N/(m·mm²)；线膨胀系数，1/℃；弹性系数，N/mm²；耐张段的代表档距，m；

Δt_a ——验收弧垂比观测弧垂滞后一段时间 τ_a 小时后，塑性伸长放出一部分 $\Delta\varepsilon_a$ 所折算的等效温升，℃，$\Delta t_a=\Delta\varepsilon_a/\alpha$，$\Delta\varepsilon_a$ 参见式（5-96）。

2. 验收计算弧垂的塑性伸长 ε_a 及等效温升 Δt_a 的估算

自导线挂线至检验弧垂期间由于运行应力的作用，导线要有塑性伸长放出而使弧垂增大，相当于气温升高 Δt_a。一般取平均运行应力（如 $0.25\sigma_{ts}$）下持续 τ_0 =100000h 的电线塑性伸长率作为 $\varepsilon_0=C\tau_0^m$。架线过程中张力放线及观测弧垂期间，以平均运行应力经历等效架线时间 τ_e'（约 2～3h），放出塑性伸长率为 $\Delta\varepsilon_e=C(\tau_e')^m$。则架线后剩余未放出的塑性伸长率（初伸长率）为 $\varepsilon_e=\varepsilon_0-\Delta\varepsilon_e$。架线后以平均运行应力又经历等效时间 τ_a' 小时后才检查验收弧垂，此时又会放出塑性伸长率 $\Delta\varepsilon_a$，可写出其近似计算式为

$$\Delta\varepsilon_a\approx C\left[(\tau_e'+\tau_a')^m-(\tau_e')^m\right]\approx\varepsilon_e\left[\frac{(\tau_e'+\tau_a')^m-(\tau_e')^m}{100000^m-(\tau_e')^m}\right] \tag{5-96}$$

上式中的等效时间 τ_e'、τ_a' 可按下式近似求出

$$\tau_x'\approx\left(\frac{\sigma_x}{\sigma_{15}}\right)^{7.674}\times e^{0.0882(t_x-15)}\cdot\tau_x \tag{5-97}$$

上两式中 $\Delta\varepsilon_a$ ——架线后经历 T_a 验收弧垂，电线放出的塑性伸长率；

m ——塑性伸长率的指数量，与式（5-77）中相同，可参见表 5-28 及表 5-29 选取；

ε_e ——架线时所考虑未放出的塑性伸长率（初伸长率）；

τ_x' ——分别代表 τ_e' 和 τ_a' 为放、架线过程中和滞后验收弧垂时间内以折算到平均运行应力 σ_{15} 下所持续的等效时间，h；

τ_x ——分别代表 τ_e 和 τ_a，为放、架线过程中电线受应力 $\sigma_x = \sigma_e$ 下持续的实际时间（放线和架线应力及时间各不同）和验收弧垂时电线受应力 $\sigma_x = \sigma_a$ 所持续的实际滞后时间，h；

σ_{15}、σ_x ——分别为电线的平均运行应力和放、架线及验收弧垂滞后期间的应力，N/mm²；

t_x ——分别代表 t_e、t_a，为放、架线和验收滞后期间的气温，℃。

3. 验收计算弧垂与实测弧垂的比较和处理

（1）验收计算弧垂（即可接收的理论计算弧垂）。依据式（5-95）算出的应力 σ_a 代入式（5-98）算出

$$f_a = \frac{\gamma_1 l^2}{8\sigma_a \cos\beta} \tag{5-98}$$

（2）验收计算弧垂与实测弧垂的比较和处理：与验收计算弧垂相同的气温 t_a 和架线后运行应力为 σ_a、运行 τ_a 时后现场实测 l 档距的弧垂为 f_{as}，它与验收计算弧垂 f_a 之差值做如下判定与处理：

1）$\Delta f_a = f_{as} - f_a$ 其正负值在验收规范允许之内者为合格；

2）Δf_a 为负值且超过规定范围，表示架线弧垂过小，应放松弧垂；当 Δf_a 为正值且超过规定范围者，表示架线弧垂过大，应收紧弧垂。收紧或放松弧垂的方法参见式（5-87）。

第六节　电线防振与防舞

一、电线受风振动的种类、损害及防护概况

架空线路上电线受风的作用经常出现的是均匀低风速下的微风振动；个别覆冰情况下的舞动；当分裂导线加间隔棒时有时会发生次档距振荡。这些风振的一般特性，危害及其防护的概况列于表 5-37 中。

表 5-37　电线风振种类、危害及防护概要

项目 \ 振动类别		微风振动	舞动	复导线次档距振荡
振动状态	频率（Hz）	3～150	0.1～1.0 （1～4 个波腹/每档）	1～5 （1～数个波腹/每次档距）
	振幅（单峰）	一般小于电线直径	12m 以下	电线直径～500mm
	持续时间	数小时，有时可达数天	数小时	数小时
	风速（m/s）	0.5～10	5～15	5～15
	主要振动方向	垂直	垂直或椭圆	水平或椭圆
产生振动的原因	主因	均匀微风作用下，在电线下风侧发生周期性的卡门涡流激起电线上下振动	电线外形不对称，风对电线产生上扬力和曳力所致	两根子导线较近且构成的平面与风向接近时，上风侧导线的尾流招致下风侧导线失去平衡，又引起上风侧导线同时产生振荡
	从因	电线运行应力大（消耗振动功率小），电线自阻尼性能差，风受到扰乱少的地形，档距长	覆冰不对称，绞线表面线股凹凸大，导线截面大	分裂间距与电线直径的比值太小，风很少受干扰的地形，次档距太大
危害		电线疲劳断股，损坏防振装置、绝缘子和金具，振松紧固螺栓、磨损电线	相间短路烧伤或烧断电线，引起电线、护线条断股，间隔棒、防振装置、绝缘子、金具及杆塔等损坏	子导线鞭击磨损间隔棒、金具
防护措施		安装防振装置，降低运行应力，改善线夹性能，加强悬点抗弯刚度，使用自阻尼好的电线和分裂导线，采用组合线线夹	增大线间距离和上下线的水平位移，缩小档距，加装相间间隔棒及舞动阻尼器，采用不易覆冰的光滑电线，避开易舞动地区，减小弧垂	增大子导线间距，变更下风侧子导线位置使不受上风侧子导线的屏蔽，采用阻尼间隔棒等

二、电线微风振动的基本原理

（一）振动的形成和波形

当电线受到稳定的横向风均匀作用时，在电线背风面将形成按一定频率上下交替出现的气流漩涡，它的依次出现和脱离使电线受到同一频率的上下交变的冲击力。该冲击力的频率f_w与风速和电线直径有关，根据试验可按下式计算

$$f_w = K\frac{v}{d} \tag{5-99}$$

式中 f_w ——风的冲击频率，Hz；

K ——系数，与雷诺数有关，K=185～210，一般用 200；

v ——垂直于电线的风速，m/s；

d ——电线的直径，mm。

各点漩涡的脱离是随机的，故作用在电线上的力，沿着电线长度上各点的相位也是随机的。因此不是一有风，电线就会振动的。如果电线以某一频率f_c振动，且f_c与f_w相近在±20%范围之内，则漩涡的脱离受电线的振动频率控制，同时沿电线各点脱离，形成同步，结果电线的微风振动开始了。这种现象通常称为锁定效应或同步效应。振动开始以后，如果振动频率保持在锁定范围之内，作用在电线上的升力就会逐步增加，一直到达饱和振幅为止。

电线的微风振动常以驻波振动型式表示（也常有拍频 beat 波和行波），可以看成是两端固定的弦线振动型式。故电线的振动频率可按下式计算

$$f_c = \frac{n}{2L}\sqrt{\frac{T}{m}} = \frac{1}{\lambda}\sqrt{\frac{T}{m}} \tag{5-100}$$

式中 f_c ——电线的振动频率，Hz；

n ——档内振动半波数，为正整数；

L ——档内电线长度，m；

T ——电线张力，N；

m ——电线单位质量，kg/m；

λ ——波长，m。

当 $f_c = f_w$ 时，即可求出导线振动之波长 λ 为

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{d}{400v}\sqrt{\frac{T}{m}} \tag{5-101}$$

式中符号含义同式（5-99）、式（5-100）。

微风振动的波形有驻波、拍频波、行波等。其中拍频波，其振幅周期性地由最大值变到零。行波仅在振动发生的初期看到档间某点出现间歇性的振动，即振动在档内往返移动。研究微风振动通常是以简单的驻波谐振函数来描述，即假定电线是一根受拉力的无阻尼、完全柔软的弦，则在产生稳定振动时，导线上任一点离开平衡位置的位移，在沿档距长度上或是时间上都是按正弦规律变化的，在理想情况下形成的驻波振动可表示为

$$Y = A\sin\frac{2\pi x}{\lambda}\sin 2\pi ft \tag{5-102}$$

式中 Y ——电线任一点离开其原始平衡位置的位移，m；

A ——电线振动波腹点的最大振幅，mm；

x ——自振动节点（或悬挂点）沿电线至任一点的距离，m；

λ、f ——振动波长，m 频率，Hz；

t ——计算时间，s。

图 5-24 中实线波形为 $\sin 2\pi ft = 1$ 的时刻下波形沿电线分布的最大位移图形；虚线表示 $\sin 2\pi f = -1$ 时的最大位移图；其他时刻下的位移则在包络线的范围内上下变化。

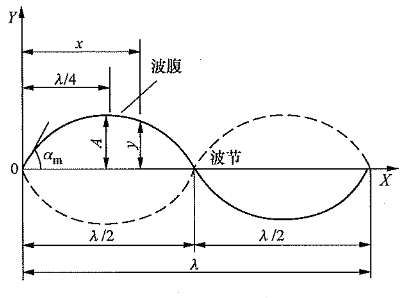


图 5-24 驻波示意图

由于在一定振动频率下的振动波在波节点仅有角位移，且在电线位置上不变，特别是档距两端电线悬挂点，对各种频率的振动波均为波节点并受线夹的约束使电线不能自由转动，同时在此处还经常受到较大的拉、弯曲和挤压等静态应力。因此该处若受到长期强烈的振动易产生电线材料的疲劳断股等损坏，这是电线防振的关键部位。波节点最大振动角由式（5-102）导出为

$$\alpha_m = 60\arctan\left(\frac{2\pi A}{\lambda}\right) \tag{5-103}$$

式中 A ——振动最大振幅，mm；

λ ——振动波长，mm；

α_m ——最大振动角，（′），α_m 是衡量振动强弱的重要参数，将在后面再加说明。

（二）振动强度及其影响因素

输电线的电线振动，由风力输入给振动体的能量和振动体系内消耗的能量达到平衡状态时，就确定了导线稳定振动的振幅。按此观点估算振幅，可为防振设计提供依据。所谓振动强度是指振动幅值及其振动延续时间的多少，是衡量线股承受的动弯应力及振动次数是否能使电线在寿命期内不产生振动疲劳断股的重要判据。

1. 振动输入能量

振动时输入风功率的大小与风速、振幅、电线直径、频率以及档距长度等有关，但这是一个很复杂的问题，其计算多系经验公式或曲线。一般认为风输入给电线的功率（mW/m）与 f^3d^4 成正比并与振幅 A_a 及风速 v 成函数关系。文献中的 SLETHEI 曲线，当风速为 5m/s 和 1.7m/s 时，风输入的能量可近似地表达为

$$W_5=\left[13.5\times\left(\frac{2A_a}{d}\right)+6.9\times\left(\frac{2A_a}{d}\right)^2\right]\times f^3d^4\times10^{-9}$$

$$W_{1.7}=\left[28\times\left(\frac{2A_a}{d}\right)+17\times\left(\frac{2A_a}{d}\right)^2\right]\times f^3d^4\times10^{-9}$$

（5-104）

式中 $W_{1.7}$、W_5 ——当风速为 1.7m/s 或 5m/s 时，电线上输入的风能，mW/m；

A_a ——电线的振幅，mm；

d——电线的直径，mm；

f ——电线的振动频率，Hz。

由上式可知，风速为 1.7m/s 时风能较大，约为数 10mW/m；而当风速为 10m/s 时，则仅为风速 5m/s 时的 1/3。

2. 电线振动的自阻尼作用

风输入电线能量使其振动时，电线因其结构和材料固有的自阻尼作用消耗输入能量，耗能也随振幅而增加，当输入能与耗能平衡时，电线便维持在该振幅下稳定振动，如图 5-25 中的 A_{a2} 点。

电线自阻尼作用主要是电线振动时，线股之间发生滑移，各线股接触面处的摩擦作用引起能量消耗。其次是线股材料的迟滞阻尼，即每根线股内部的能量损耗。另外也包括电线振动时与空气之间的粘滞摩擦所引起的能量消耗。其总阻尼耗能量大小与电线张力、振动波长、振幅及频率等因素有关，难以作理论上的处理。测量电线自阻尼有各种方法，东北电力学院曾对 LGJQ-400 导线的自阻尼进行了试验，将其结果近似表达成式（5-105），以资参考。

$$E_c=50\left(\frac{\lambda}{2}\right)^{-4.5}\times\left(\frac{2A_a}{d}\right)^{2.5} \qquad (5\text{-}105)$$

式中 E_c ——电线自阻尼功率，W/m；

A_a——振幅，mm。

从式（5-105）及式（5-100）可看出，频率不变时，张力越大则波长越长而自阻尼越小，故振动较大。如张力不变，频率增快，则波长减小，自阻尼增大，故振幅减低。旧导线的自阻尼较新导线有所降低，其阻尼功率约为上式的 0.7 倍。电线的蠕变及涂油脂的防腐电线也会影响其阻尼作用。

从防振的角度出发，专门制造一种阻尼作用大的导线称自阻尼导线或防振导线，其阻尼作用可达到一般导线的 3～15 倍，其制造原理多是设法提高线股间的摩擦作用，即当导线提高拉力后，要避免各线股咬紧在一起且不产生严重的磨损。上海电缆研究所研制生产的自阻尼导线，结构型式是采用两层拱型的铝线股保持线股之间有 0.3～3mm 的间隙。另外的自阻尼线采用变化电线外径或单位长度质量避免共振。有的是在线股层间介入软金属或高滞后作用的非金属材料提高阻尼作用。自阻尼导线是沿整个档内消耗振动能量，避免了装防振锤或防振线将耗能集中到档中几个点所产生的负面影响（如防振锤线夹振松磨伤导线、防振锤本身受振疲劳损坏，线夹出口处出现节点使导线疲劳断股等）。

3. 防振器对振动的阻尼作用

防振器（亦称阻尼器、消振装置等），是专门为降低微风振动强度防止电线引起疲劳断股而在电线上装设的一种减振部件。目前世界上有数十种防振器可供使用，我国常用的有 FD 哑铃型（stockbridge）防振锤和经过改进的新 FR 音叉（锤头形状）型防振锤和护线条以及防振线阻尼间隔棒等。绝大多数防振器的消振原理是将振动能量吸收转化为热能或声能而散发掉，从而降低了导线的振幅，或是将大部分振动行波反射回到档距中及限制那些严重的振动传给不耐振的悬挂点。另外，绝缘子串、金具及杆塔等也对振动有一定的阻尼作用。分裂导线通过间隔棒把子导线联系在一起，使各子导线互相牵扯，从而破坏和抑制了分裂线持续稳定振动的形成，起到干扰和阻尼的作用，阻尼间隔棒也有消振的作用。

防振器的阻尼效果，一般是通过室内试验和室外测振对比等方法得出。

4. 按能量平衡原理估算振动幅值

图 5-25 是根据电线达到稳定振动后，风能的输入应与整档电线自阻尼能量及所有防振锤消耗能量之和相平衡而得到的。据此可估计电线振动可能达到的最大振幅。从该图可知电线阻尼消耗能量与振幅 2.5 次方成正比，而输入之风能基本与振幅一次方成正比。故加上防振锤消耗能量，曲线稍有上升后，其平衡交点所示之振幅下降甚多。从图 5-25 中还可看到，当没有消振装置时，输入风能曲线与裸电线自阻尼耗能曲线的交点 2 即为能量平衡点，此时的稳定振动幅值为较大的 A_{a2}。如果 A_{a2} 振幅引起的动弯应力或应变不超过允许值，则说明不装消振装置也不会使电线产生疲劳断股。否则应加装消振装置。如图中虚线是电线自阻尼和消振器及其振动体系总耗能曲线，它与风力输入风能曲线的交点 1 相对应下的振幅为 A_{a1} 比 A_{a2} 有所降低，若经检查振幅 A_{a1} 降到危险程度以下，则表明防

振设计是适当的。

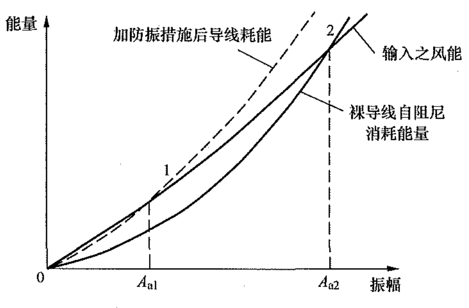


图 5-25 防振锤减振原理示意图

5. 影响电线振动强度的因素

（1）振动频率对振幅的影响。对已运行线路，档距长度及导线张力等都是已知数值，假定一个频率值，就可按功率平衡关系确定一个对应的振幅值，将各个频率所对应的振幅汇集起来就可绘制成如图 5-26 所示的振幅与频率关系曲线 1，该曲线表明不同频率下所产生的振幅值。图中显示一般在低频区段出现最大振幅。而普通防振锤在 10Hz 以下的低频段消振效果则不太好。

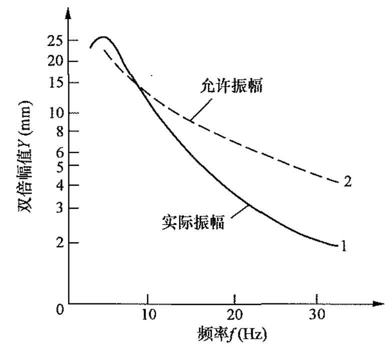


图 5-26 电线振幅与频率关系

电线悬挂点处的动弯应力（或动弯应变 ε ）与振幅之间的关系也随频率不同而变化，若根据疲劳试验或运行经验，可确定导线在线路寿命期内不产生疲劳断股允许的动弯应变（如一些国家对铝股采用 $\varepsilon=100\mu$ ），则可根据该允许应变下频率与允许振幅间的关系作出如图 5-26 中的虚线 2。若曲线 2 在曲线 1 之上，说明导线振动是安全的。

（2）地形及地物对振动的影响。地形、地物（合称地区条件）对线路振动强度有显著的影响，产生振动的必要条件是气流的均匀性及风向的恒定性。平坦、开阔地区有利于气流的均匀流动，易形成强烈振动的条件，并延长振动的持续时间。相反情况是地形交错起伏，或线路附近有建筑物、树林等地物，对气流产生摩擦，破坏气流的均匀性，不易形成振动条件。当树林高度达到悬挂点高度的一半时，振动强度可降低 50%左右；超过悬点时降低 90%而达到安全的程度。一般将地区条件划分为 A、B、C 三个条件，A 类地区属振动强烈地区；C 类属振动十分轻微或无振动地区；B 类介于两者之间。

根据能量平衡条件可以估算出电线振动体系最大可能的振幅，但由于地区条件的影响，电线实际出现的要小于这一最大振幅。其影响程度可乘以地形系数（或环境系数）来表示，一些典型地区条件下的地形系数 k_T 列于表 5-38 中。$k_T=\eta_p/\eta_r$，式中 η_p 为在足够长的时间中所测得的最大振动水平（$2A_a/d$）；η_r 从系统能量平衡计算出的最大可能振动水平。

表 5-38 地区条件与地形系数

地区条件	地形系数
非常平坦且靠近水面的开阔地带	0.8～1.0
非常平坦开阔的地带	0.45～0.55
有小树丛的轻度起伏地带	0.3～0.4
有些树林的平坦地带	0.1～0.2

（3）风速、风向对振动的影响。风速是输给电线能量使之振动之源，维持导线振动的下限风速一般取 0.5m/s，风速增大仍能引起导线振动的最大风速称上限值，它受地形、地物及悬点高度等影响，风速越大不均匀气流距地面高度亦增高，若超过悬点高度就不会引起振动。一般线路的振动上限风速为 4～6m/s，大跨越档因在平滑的水面上方，其上限风速可达 8～10m/s 或按经验公式式（5-106）计算

$$v_m=0.0667h+3.33 \tag{5-106}$$

式中 h ——导线悬挂点高度，m；

v_m ——振动风速上限值，m/s。

导线能否产生稳定振动还与风向有关。观察到风向与电线轴线的夹角在 45°～90°时易产生稳定振动；当在 30°～45°时，振动的稳定性小；在 20°以下时，一般即不出现振动。

根据风速及风向性质，可估计线路的振动严重程度。若先搜集线路沿气象台、站记录风速、风向资料，再从线路走向及地区条件，悬点高度等确定风向夹角及振动风速上、下限值，以此可判定历年气象记录中能出现振动风速时间（或次数）与历年总时间（或总观测次数）之比值，以判断振动持续时间系数。

（4）档距及悬挂点高度的影响。

1）档距长度的影响。在没有安装防振器和忽略档端金具等部件消耗振能的情况下，电线输入风能和自身耗能以及产生振幅的大小与档距长度无关，但若安装了相同数量的防振器后（其阻尼耗能假定相同），则小档距振幅会下降多，而大档距振幅会下降少（因长

档距输入风能多)。另外，自式（5-100）可知，档距愈长，能满足半波数为整倍数的振动频率数也愈密集，与式（5-99）的风力冲击频率相接近而建立稳定振动的机会就愈多，振动持续时间也自然会增加。另外档距两端绝缘子、金具与杆塔横担等部件对振动有阻尼作用，小档距可不需安装防振器（如 100m 以下），而对大档距其阻尼则不大。

2）悬挂点高度的影响。当电线悬挂点的高度增加时，在平坦开阔地区可能使振动上限风速提高，使振动频率的范围扩大，也使振动延续时间增加。架设在平坦开阔地区的线路，悬挂点高度随档距二次方的函数而增加，两者结合一起考虑，对振动风速范围及振动相对延续时间的影响见表 5-39。

表 5-39　档距长度对振动的影响

档距（m）	电线悬挂点高度（m）	振动的风速范围（m/s）	振动的相对延续时间
150～200	12	0.5～4.0	0.15～0.25
300～450	25	0.5～5.0	0.25～0.3
500～700	40	0.5～6.0	0.25～0.35
700～1000	70	0.5～8.0	0.30～0.40

（5）导线张力对振动的影响。提高电线张力不仅会增加振动强度（振幅和振动次数），而且会降低导线的疲劳极限。因电线张力提高后，其自阻尼作用下降，振幅增大且波长也增大。由于电线所受的动弯应力与振幅对波长的比值有关，因而动弯应力的增加不是与导线张力的增大呈线性关系。国际大电网会议试验资料表明，导线张力在 8%UTS（导线拉断力）以下时，很少有振动，随着张力增大距线夹出口 89mm 处$\left(即3+\frac{1}{2}\text{in}\right)$处的弯曲幅值（$A_{89}$）迅速增加，张力达 15%UTS 时，弯曲幅值达到最大值，此后张力再增大弯曲幅值增加极微。此外导线张力提高后，振动频率及振动延续时间都随之有所增加，因而振动次数也会增多。导线张力约在 20%UTS 以下时，振动次数的增加几乎与张力的提高成直线关系。但当导线张力超出 20%UTS 以后，振动延续时间减少，因而振动次数逐渐趋于恒定状态。

提高导线张力引起导线疲劳极限（应力）降低。材料的疲劳极限与静态应力（平均应力）的大小有关，线路上的导线是在有应力的条件下产生振动的，线股的实际疲劳极限将降低。要想不使导线产生振动疲劳断股，必须限制振动的弯曲应力及振动强度。

（6）电线规格及结构对振动的影响。

1）电线断面形状及其表面状况的影响。电线断面形状如果能破坏风在电线背风侧卡门旋涡的建立（如三股钢丝绞制的钢绞线），就不会建立稳定振动。而光滑型（或称压缩型）的导线，其直径与截面的比值较小，虽能减少风荷载和减少覆冰及舞动，但微风振动的振幅及延续时间则变得严重。

2）电线截面和直径以及材质的影响。风输给电线的振能随电线直径增加而加大。振动频率又随直径增加而变低，而低频范围的电线自阻尼又减小。这两种因素使大直径导线振动严重，给防振带来困难。为此可采用分裂导线来减振。大直径导线若股层数及股数增多，其阻尼作用会增加。但如果是扩径或空芯导线，截面与重量比小，则易于振动。增大导线刚度有利于降低动弯应力（如护线条就有加强导线刚度的作用）。

导线直径与其单位质量的比值愈大则振动愈严重，故铝绞线比铜绞线和钢绞线振动严重；铝钢截面比大的比小的振动严重。用高强度材料制造的电线，其线股材料的疲劳极限与其破坏强度的比值，却随破坏强度的提高而下降（如高强度钢丝的疲劳极限等于破坏强度的 28%，而特高强度的钢丝则降到 24%）。

（三）电线疲劳极限及其影响因素

1. 电线疲劳极限的定义

一般金属材料的疲劳极限是用振动弯曲应力与振动次数的关系（$\sigma-N$）曲线来表示，即纵坐标为振动弯曲应力，横坐标为振动次数的对数值。此曲线趋于平缓时即为材料的疲劳极限应力（常简称疲劳极限)。对于输电线路电线的寿命一般按 40 年考虑，估计微风振动次数在（10～100）×10^6之下的动弯应力值作为电线的疲劳极限（若为钢芯铝线，应为铝股的疲劳极限），这是防振设计的重要依据。当导线受到的动弯应力低于或等于铝股的疲劳极限时，导线即使达到上述估计的振动次数也不会产生疲劳断股。

2. 影响疲劳极限的因素

材料的疲劳极限与静态应力（平均应力）的大小有关，线路上的电线是在带有静态拉应力的条件下产生振动的，此时线股的实际疲劳极限（仅有动弯应力）将会降低，特别是对铝股，其数值可根据古德曼曲线查取，或按下式计算：

$$\sigma_{am}=\sigma_a\times\left(1-\frac{\sigma_m}{\sigma_{ts}}\right) \tag{5-107}$$

式中　σ_{ts}、σ_a——铝股材料的破坏强度及其疲劳强度，N/mm²；

σ_m、σ_{am}——铝股承受静拉平均应力及该应力下的疲劳强度，N/mm²。

铝单股无静拉张力下的疲劳极限 σ_a 约为 57～62N/mm²。高的可达 70N/mm²。式（5-107）中如已知铝股的 σ_{ts}=169N/mm²，σ_a=57N/mm²（相当于振动 10^8

次下的值）。当钢芯铝线的平均运行应力（EDS）为破坏应力的 25%时，可推算出铝线股承受的平均应力约为 σ_a =30% σ_{ts}，将其代入式（5-107），即算得铝股有静拉应力下的疲劳极限降为 σ_{am} =39.9N/mm²，为无静拉应力作用时的 70%。如果考虑铝单丝绞制成导线后，其疲劳极限还要降低，两者的比值约为 0.5～0.8（如上例 σ_{am} 降为 20～32N/mm²）。导线在悬垂线夹中，其线夹船体曲率使导线又产生弯曲附加应力以及在防振器、间隔棒等夹具处又产生径向挤压造成压痕以及受力不均等因素，这些夹具处导线疲劳极限还要再降低至 50%～70%（后者为装护线条时）。因此，铝股的疲劳极限降到仅有 10～20N/mm² 的水平，其降低程度与线夹类型和质量有关，加装护线条或胶垫能减少降低程度。若限定容许动弯应变 ε =±150 $\mu\varepsilon$，铝股弹性系数为 63000N/mm²，则允许的动弯应力为：σ_b =150×10⁻⁶×63000=9.45N/mm²，其值已接近上述实际疲劳极限值。

作为地线使用的钢绞线，使用应力与拉断应力比值 K 较导线为小，故一般认为平均静张拉应力对疲劳极限的影响是微小的。钢绞线的疲劳强度大约是铝线的二倍。

三、电线无危险振动的判断

1. 判断振动强度的标准

电线悬挂点及各种线夹处是振动疲劳损害最危险的部位，此处电线所受的动弯应力大小要想计算或测量都是困难的。一般都是测量该处附近的振动弯曲幅值，间接地求出振动角或动弯应变来表示振动强弱（它与动弯应力成正比）。目前国际上多以测量线夹出口 89mm 处电线相对于线夹的振动弯曲幅值 A_{89}（峰对峰值），间接计算出线夹出口处的振动角 a 或动弯应变 ε_c 的大小来衡量振动的强度是否免于振动疲劳断股。式（5-103）a 振动角算式可近似地用式（5-108）表示。

$$\alpha = 60\arctan\left(\frac{A_{89}}{2\times 89}\right) \tag{5-108}$$

式中 A_{89} ——距线夹出口 89mm 处动弯幅值（峰-峰），mm；

α ——振动角，（′）。

动弯应变系指距线夹出口 89mm 处动弯幅值 A_{89} 引起动弯应变（单位长度上、单位应力下的变形量），常用近似公式表示为

$$\varepsilon_c = 354\, dA_{89} \tag{5-109}$$

式中 d ——电线外层线股直径，mm；

A_{89} ——距线夹出口 89mm 处的弯曲幅值（峰-峰），mm；

ε_c ——线夹出口处的动弯应变（峰-峰），$\mu_\varepsilon = 10^{-6}$ m/m（如算出 ε_c =300 μ_ε，应表示为 $\varepsilon_c = \pm 150\mu_\varepsilon$）。

另外，国外测振取得 A_{89}，多通过 Poffenberger-Swart 方程计算动态弯曲应力 σ_b 单峰值为

$$\sigma_b = E_0\varepsilon_c / 2 = dE_0P^2A_x / 4(e^{-Px} - 1 + Px) \tag{5-110}$$

$$\varepsilon_c = dP^2A_x / 2(e^{-Px} - 1 + Px)$$

$$P = \sqrt{\frac{T}{EI}}, 1/\text{mm}$$

式中 d、E_0——分别为电线外层线股直径，mm；弹性系数，N/mm²；

x、A_x——测振仪传感器距线夹出口的距离，规定为 89mm；及该处的弯曲幅值（峰-峰）mm；

T——电线张力，N；

ε_c ——线夹出口处的动弯应变(峰-峰)，μ_ε；

EI——各线股弯曲刚度之总和，N•mm²。

2. 无危险振动的标准

目前，国内外尚无判断无危险振动的一致标准，大都是根据各自的经验加以规定。总结自己的经验并借鉴国外资料用振动角的大小来判断振动有无危险。自 20 世纪 70 年代末我国测振动就试用动弯应变的标准来判断有无危险振动。表 5-40 列出一些国家的判别标准。

表 5-40 无危险振动的判断标准

线路类别	线别	意大利	加拿大	中国①	美国	日本	苏联
普通线路	铝绞线 钢芯铝绞线	±150 μ_ε	D≥17.8mm ±150 μ_ε D<17.8mm ±75 μ_ε	±150 μ_ε	±100 μ_ε	硬铝线及耐热铝合金线 ±100 μ_ε	EDS=0.2～0.25σ_{TS}：10′ EDS>0.25 σ_{TS}：5′
	铝合金绞线 钢芯铝合金绞线	±150 μ_ε	—	±150 μ_ε	—	高张力铝合金及高张力耐热铝合金线：±120 μ_ε；一号铝合金线：±150 μ_ε	

续表

线路类别	线别	意大利	加拿大	中国[①]	美国	日本	苏联
普通线路	钢绞线、铝包钢绞线及钢芯铝包钢线	$\pm300\ \mu_\varepsilon$	$A_{89}<0.381$mm（峰-峰）	$\pm300\ \mu_\varepsilon$	—	$\pm400\ \mu_\varepsilon$	
大跨越线路	铝绞线、铝合金及钢芯铝绞线	$\pm75\ \mu_\varepsilon$	—	$\pm100\ \mu_\varepsilon$	—		
	钢绞线、铝包钢绞线、钢芯铝包钢线	$\pm150\ \mu_\varepsilon$	—	$\pm150\ \mu_\varepsilon$	—		

① 数值系《架空输电线路微风振动》的建议，尚未形成规定，但已在十余年的测试判断中认为行之有效。

四、电线防振措施

（一）电线平均运行张力与防振措施的关系

1. 平均运行张力的定义及其对振动强度的影响

本节前面已介绍电线张力对振动强度影响很大。但线路上悬挂的电线张力随气象条件的变化而不同，为了能表达电线实际发生振动条件下的代表性张力，以此张力振动所产生的振动强度和疲劳效果，将与实际线路情况相等，就将此代表性张力称为平均运行张力（EDT）。张力大小与导线截面有关。为了消除截面大小的差别，取为平均运行应力（国际上通常以 EDS 表示）。但又为了消除导线规格、材料及结构等因素的不同而引起的差别，以及便于相互对比，平均运行应力一般不以绝对应力表示，而是采用平均运行张力与导线拉断力（UTS）比值的百分数表示。振动多发生在无冰低风速（0.5～10m/s）的各种气温下，故一般取无冰、无风、年平均气温附近的应力作为平均运行应力（或张力）。但对寒冷地区，也可选用无冰、无风、年平均最低气温（或冬季平均气温）时的应力作为导线的平均运行应力（或张力）。除此之外，若有某些防振产品制造厂家对电线应力（或张力）的标准提出要求时，亦可按其要求采用。如意大利赛尔维（SALVI）公司就提出“最低气温月平均气温、无风、无冰的导线应力（或张力）”来确定防振措施的采用。

2. 电线平均运行张力与防振措施的关系

自 1960 年国际大电网会议报告提出导线 EDS 与防振要求的规定，对世界各国线路设计有很大影响。如表 5-41 所示。我国电力建设研究所及设计运行单位对电线振动情况做了大量调查、测试和研究工作，提出的导线平均运行张力与防振措施的成果已被线路设计规程采用至今，见表 5-42。苏联 1968 年也提出了平均运行应力与防振措施的规定，列于表 5-43 中。这些表中都规定了无需采取防振措施的条件和平均运行张力（或应力）的上限值。但相对比较我国的防振要求比较高，如档距超过 500m 不论平均应力再低，地形条件再屏蔽均需采取防振措施。

表 5-41　　国际大电网会议报告的平均运行张力（%UTS）上限与防振措施

电线类别＼防振措施		无需防振	护线条	防振锤	护线条及防振条
铜绞线		26	—	—	—
钢芯铝绞线		18	22	24	24
全铝绞线		17	—	—	—
铝合金绞线		18	—	26	—
钢绞线	刚性线夹	11	—	—	—
	摆动线夹	13	—	—	—

表 5-42　　我国现行设计规范中导、地线平均运行张力（%UTS）上限与相应的防振措施

情况	防振措施	平均运行张力的上限（拉断力的百分数）	
		钢芯铝绞线	镀锌钢绞线
档距不超过 500m 的开阔地区	不需要	16	12
档距不超过 500m 的非开阔地区	不需要	18	18

续表

情况	防振措施	平均运行张力的上限（拉断力的百分数）	
		钢芯铝绞线	镀锌钢绞线
档距不超过 120m	不需要	18	18
不论档距大小	护线条	22	—
不论档距大小	防振锤（阻尼线）或另加护线条	25	25

表 5-43　　苏联（1968 年）防振规定中平均运行应力（EDS）与防振措施

地区条件			档距（m）	电线类别	平均运行应力（N/m^2）		
				钢芯铝绞线	49 以上	39.2～49	低于 39.2
				铜绞线	107.8 以上	98～107.8	低于 98
				钢绞线	215.6 以上	176.4～215.6	低于 176.4
防振措施	A	开阔平地或小丘地区	150～500		每档两个防振锤	每档一个防振锤	不需要防振
			75～150		每档一个防振锤	每档一个防振锤	
	B	崎岖起伏地区、稀树或矮树区	100～500		每档一个防振锤	不需要防振	
	C	a)树高超过悬挂点的多树丛山区；b)线路沿山区谷底走线	无论大小		不需要防振		

据悉苏联 1983 年又将表 5-43 中防振锤安装个数予以减少，其主要差别介绍如下：

线路通过 B 类地区时，每档每根电线上只安装一个防振锤。

线路通过 A 类地区时，如档距在 200m 以下，则每档每根导线上只安装一个防振锤。档距超过 200m 则分两种情况：有宽阔水面的跨越档和无宽阔水面的跨山谷档。具体规定：长度在 500m 以下的跨越档（跨山谷则为 800m 以下）推荐在每根导线、地线上于档距两端各装一个防振锤；长度在 500～1500m 的大跨越档（或山谷宽 800～1500m 的大跨山谷档），由于在较宽频率范围中有较强烈的振动，必须在每根导线、地线上于档距两端各装具有不同特性的两个防振锤，重者靠近塔身，轻者远离塔身。在更大的跨越中，安装在粗重导线上的防振锤数量增加到每端 3 个及以上，依次排列在导线上。

（二）电线 T/m 值与防振措施的关系

根据很多实际线路的运行经验和理论分析，认为以导线张力与其单位长度质量之比 T/m 来确定导线的微风振动特性是更为确切的。早期在调查和分析基础上推荐的用 EDT 百分数估计导线疲劳损伤的可能性的经验方法，是因为当时的导线基本上为正常型和加强型。但其后出现的全铝合金导线和小、大铝钢截面比导线如仍依该推荐值，就会导致全铝合金和特小铝钢截面比导线疲劳断股或大铝钢截面比导线强度不能充分利用。

架空线路在 B 类地区（似指一般无水面平坦地区）的单导线，当档距不超过 500m 时，在最低气温月的平均气温条件下：

无护线条：$\dfrac{T}{m}\leqslant 16900$，$m^2/s^2$ 是安全的；

有护线条：$\dfrac{T}{m}\leqslant 17500$，$m^2/s^2$ 是安全的；

档中一个防振锤：$\dfrac{T}{m}=19500\sim 20500$，$m^2/s^2$ 是安全的；

档中 2 个防振锤：$\dfrac{T}{m}=21500\sim 22500$，$m^2/s^2$ 是安全的。

以上表明，电线的张力愈大，单位长度质量愈小其振动愈严重。以此考虑防振也就照顾到了高强度铝合金导线和特强型钢芯铝绞线的振动严重性（T/m 大），并充分利用了大铝钢截面导线的耐振强度（T/m 小）。

意大利塞尔维（SALVI）公司制定的防振锤使用导则中以电线最低气温月平均气温无风、无冰下的张力 T（N）与电线单位质量 m（kg/m）的比值来判断振动的强度和确定防振措施的标准，目前，我国生产的 FR 型防振锤，其安装标准就是应用上述 T/m 判据。

（三）防振锤类型及特性

目前世界上可供使用的防振锤类型多达十余种，我国工程上采用的三种予以介绍如下。

1. FD、FG 哑铃型司托克布里奇（Stockbridge）防振锤

这种防振锤的形状见附录 D 附图。防振锤的阻尼性能主要取决于高强度钢绞线的弹性及重锤质量与锚

接工艺等，其阻尼振动的作用是利用两个重锤振动时使钢线股间滑移而产生的摩擦阻尼力。防振锤的重锤的振动是以自身回转和上下摆动的运动，故有两个共振频率。在此频率附近时消耗的功率最大。防振锤的特性与重锤质量、偏心距、钢线粗细、长短有关，故应根据电线的不同规格，选配不同的防振锤。当电线的截面、质量增加时，振动的危险频率范围将移至较低频谱段，故对较重电线采用自振频率低的较重防振锤。英国防振锤的总质量按下式确定

$$m=0.3036d-1.361 \tag{5-111}$$

式中 m——防振锤总质量，kg；

d——电线直径，mm。

我国防振锤总质量，也基本符合上式规律。

防振锤的各种主要尺寸、质量及适用电线截面的范围见附录 D，其典型频率特性曲线见图 5-27。该种哑铃型防振锤。

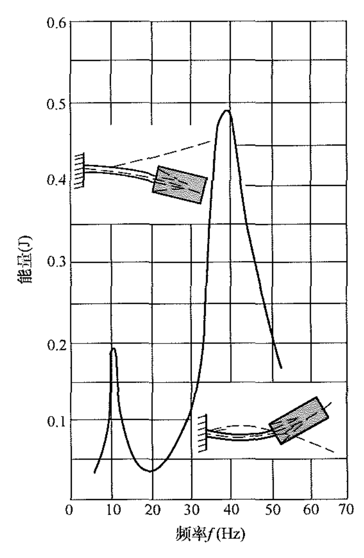


图 5-27 FD、FG 型防振锤的典型频率特性曲线

2. FR 音叉型塞尔维（Salvi）防振锤

这种意大利塞尔维公司生产的 FR 型防振锤与我国生产的 FR 型防振锤是类似的。锤头似开口音叉，其外形见附录 D 附图，它有四个谐振频率，如图 5-28 所示的 FR-3 型防振锤的频率特性图中所示。其防振频带宽度也大于 FD、FG 型防振锤。其结构原理是在固定线夹两侧的钢绞线长度不等，两端重锤质量也不相同，因而产生四个谐振频率。其结构尺寸及适用电线外径等详见附录 D。

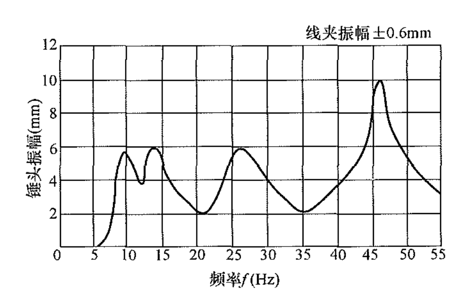


图 5-28 FR-3 型防振锤频率特性

3. 环式扭矩型防振锤

这种防振锤的结构型式很多，使用的防振环即称扭矩防振锤，如图 5-29 所示。扭矩防振锤的特点是钢绞线两端的重锤是用圆钢作的防振环代替，并分别布置在钢绞线的前后侧，形成一定的角度。当导线振动时，重锤使钢绞线受到弯矩和扭矩的两种作用，从而改善了防振锤的消振性能，扭矩防振锤可获得三个谐振频率。其结构主要尺寸及适用范围列于表 5-44 中。

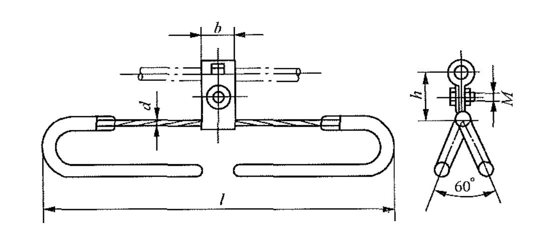


图 5-29 环式扭矩型防振锤外形图

表 5-44 环式扭矩型防振锤主要尺寸及适用范围

型号	外径（mm）	主要尺寸（mm）				钢绞线		质量（kg）
		b	h	l	M	结构	外径 d（mm）	
FH-1	8.4～9.6	50	55	480	12	19/2.0	10	1.8
FH-2	11.4～13.68	50	60	540	12	19/2.2	11	2.6
FH-3	15.2～16.72	60	75	610	16	19/2.6	13	4.6
FH-4	19.02～21.28	60	80	670	16	19/2.6	13	5.1
FH-5	23.7～27.68	60	85	690	16	19/2.6	13	6.5

（四）护线条类型及特性

护线条的主要作用是增加线夹出口附近的电线刚度和分担导线张力，减少弯曲应力及线夹处受到的挤压应力和磨损、卡伤等，并使导线在悬垂线夹中的应力集中现象得以改善，导线振动时可使导线受到的动弯应力减少 20%～50%。护线条的减振效果不如防振锤显著，故在振动强烈及平均运行张力高（见表 5-42 超过 22%UTS）的地区线路上，不能单独使用护线条。

以往使用的护线条，每根两端呈拔梢状，加工和安装都比较困难，自 20 世纪 60 年代出现了工厂预制成螺旋状的等径护线条，称预绞丝护线条，如附录 D 附图。它是采用高强度、弹性好的铝合金制造，无需专用工具便可方便地安装。预绞丝护线条在普通型悬垂线夹中的安装图如图 5-30 所示。

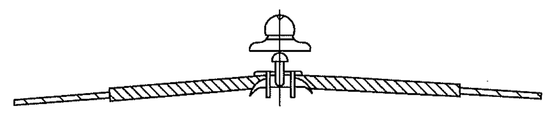


图 5-30　预绞丝护线条在普通型悬垂线夹中的安装图

在我国 110kV 及以上电压等级线路的导线及光缆复合架空地线上采用如图 5-31 所示的预绞丝灯笼型悬垂线夹。这种线夹用于普通导线时，先在线夹夹固段的导线上加垫两块半圆双曲线腰鼓形的耐磨硅橡胶垫，然后包缠预绞丝，最外层才装绞式抱箍线夹。对光缆复合架空地线，通常装两层预绞丝，内层预绞丝直接包缠于地线表面，股径小而长，胶垫包于上，再包缠第二层股径粗而短的预绞丝护线条。这种预绞丝及线夹的结构方式，其耐振、抗弯、耐磨等性能均优于普通型悬垂线夹。更具有握力大、电晕小，质量轻、磁损小的特点。

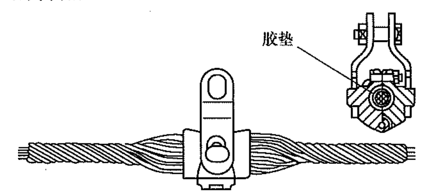


图 5-31　预绞丝灯笼型悬垂线夹图

五、防振锤安装数量

我国在高压架空线路电线振动与防护方面积累了大量的科研、测试、设计和运行的经验。20 世纪 60 年代以前，当时国内外对振动及其防护措施认识不足，电线使用应力较高，防振措施不当，出现不少振动疲劳断股现象。之后国内外通行平均运行应力的控制原则，限制并降低使用应力，增加防振锤的安装数量，使振动危害有所降低。自 20 世纪 70 年代初国内外科研、运行部门发现防振锤集中安装在档距端部超过两个以上时，其吸收振动能量并不与安装数量倍增。当输入风能很大时，仅在档距端部集中地消耗能量，不一定能使档中振动降至安全水平。过多地安装防振锤，如果再加位置或规格不当（不可能适应所有的易振频率），实质上就是将振动产生的危险弯曲应变位置，从悬挂点线夹处转移到防振锤的安装点处。故在防振锤（或防振线）的线夹处发生疲劳断股的事例，国内外多有发生（特别是悬挂点最外侧的防振器线夹处）。

目前不少国家在已制订的新的防振规定或导则中，防振锤的安装数量已有所减少，出现一档仅装一个防振锤的半档防振法及 T/m 判定振动强度法等。而我国至今仍未制定出适合我国情况的防振规定或导则。

1. 半档防振方法

电线上安装的防振锤不足或过多都对安全运行不利，从理论到测试都证明在档距一端安装防振锤，对档距中间及另一端的电线都起减振作用。因此美国、意大利、苏联等国家都明确规定，推广采用半档防振方法，如表 5-43 中苏联规定一档仅装一个防振锤的具体条件（档距可达 500m）。我国有关企业制订的《FR 型防振锤安装导则》，也采用了半档防振的方法并推广到出口该产品的国家。我国从事振动研究及测试单位的良乡电力研究所有关学者专家对单根相导线或地线建议试用如下规定的半档防振法。

（1）电线直径大于等于 22mm 时，档距在 300m 以下，每档仅一端安装一个防振锤；

（2）电线直径小于 22mm 时，档距在 200m 以下，每档仅一端安装一个防振锤。

以上建议值与以上所提国家的规定相比还是趋于比较安全的想法。美国资料提出当相邻两档均仅装一个防振锤时，应安装在同一悬挂点两侧。当采用 FR 型防振锤时，可以试用《FR 防振锤安装导则》。

2. 档内安装防振锤数量

（1）单根相导线及地线的防振锤安装数量。不少国家认为，不能简单地用增加防振锤的数量来提高能量的消耗，在档距每端安装防振锤的数量不宜超过两个，并且两个防振锤的频率特性应不同。对大跨越每端安装两个防振锤不能满足要求时，采用档中央阻尼的方法（如美国）。

持相反认识的少数国家（如英国、挪威）则认为，所需装防振锤的数量与档距长度成比例，即按每 120m 需要加 1 个防振锤。如泰晤士河大跨越，跨距 1372m，在档距每端竟装 6 个防振锤。英国 BPE 公司 1980 年建议，在每档每端安装防振锤的数量为：档距 370m 以下装 1 个；370～670m 装 2 个。

目前，我国在线路上安装防振锤数量是世界上最多的少数国家之一，对单导线每档每端的安装数量如表 5-45 所示，为 20 世纪 60 年代开始试行至今。有必

要在总结经验的基础上进行调整。

表 5-45　我国单、双根相导线及地线防振锤安装数量　m

电线外径（mm）＼档距＼每档每端防振锤个数	一个	二个	三个
D＜12	≤300	300～600	600～900
12≤*D*≤22	≤350	350～700	700～1000
22＜*D*＜37.1	≤450	450～800	800～1200

我国设计单位自 20 世纪 80 年代已将 *D*＜12 用作架空地线的镀锌钢绞线每档每端安装一个防振锤的档距由上表中的 300m 放长为 500m；二个的由 600m 增大为 700m；三个的由 600m 增大为 700m 以上不限。其他 *D*＞12 的导地线，不论档距再大最多每档每端只装 3 个防振锤，而不再加其他防振措施。

（2）分裂导线防振锤安装数量。

1）分裂导线的振动特性。分裂导线由于间隔棒的存在，使整档分成一系列次档距，微风振动的幅值在不同次档距内有显著差别，即所谓次档距效应。安装在档距端部的防振锤，在单导线的情况下，可对整个档距起阻尼作用；在多分裂导线的情况下，不能或很少对整档起阻尼作用，主要对安装侧的端次档距内振动起阻尼作用。档内的间隔棒（无论阻尼或非阻尼式）及其子导线间对风振的相互抑制和阻尼都会使各次档距内的振动强度减少。国内外的试验和测振对比都证实，双分裂导线比单导线的振动强度（包括振幅及振动次数）减少 50%以下；四分裂又比双分裂减少 50%以下。在悬垂线夹处测得的动弯应力其三者的比例关系是 4∶2∶1。

2）分裂导线防振锤安装数量。由于分裂导线振动强度低，一些国家除对二～三根分裂导线一般只在档距的一端子导线上安装一个防振锤（如美国档距小于 436m）或每档装两个防振锤（档距小于 872m）。对四分裂导线一般都不再加装防振锤，如日本、苏联等国即使采用非阻尼间隔棒也如此处理，美国及加拿大等国采用阻尼间隔棒者一般也不加装防振锤（美国能源部规范则要求装）。

表 5-46 列出苏联 20 世纪 80 年代单线（架空地线用）及双分裂导线防振锤的安装数量，并说明当分裂导线为三根及以上子导线时，无论采用何种间隔棒结构，次档距间距不小于 75m，均可不装防振锤。当相线为二分裂导线时，则一档内每根导、地线只装一个防振锤，并安装在每档内相对两端不同的子导线上，在表中未予说明的超范围者，应在每档每根子导线上安装两个防振锤。

表 5-46　苏联单地及双分裂导线防振锤安装数量

地貌特点	档距长度（m）	电线材料及钢芯铝线的铝钢截面比		平均运行应力（N/mm²）	分裂线子导线根数	每档每根线上防振锤安装数量
树木高度超过电线悬挂点高度的林区及线路通过山谷低地	任意	任意		任意	1～2	—
任何地区	任意	铝绞线		＜40	2	—
		钢芯铝线	4.5～8	＜45		
			095	＜120		
			0.65	＜135		
		钢绞线		＜185	1	—
		钢芯铝线	0.95	＜110		
			0.65	＜125		
	＜150	钢芯铝线	4.5～8	任意	2	—
严重起伏不平和有建筑物的地区，起伏不大、稀疏林或矮树林覆盖的地区	任意	铝绞线		＜45	2	—
		钢芯铝线	4.5～8	＜50		
			0.95	＜130		
			0.65	＜135		
		钢绞线		＜200	1	—
		钢芯铝线	0.95	＜120		
			0.65	＜135		

续表

地貌特点	档距长度（m）	电线材料及钢芯铝线的铝钢截面比		平均运行应力（N/mm²）	分裂线子导线根数	每档每根线上防振锤安装数量
严重起伏不平和有建筑物的地区，起伏不大、稀疏林或矮树林覆盖的地区	<300	钢绞线		>200	1	1
		钢芯铝线	0.95	>120		
			0.65	>135		
	>150	铝绞线		>45	2	1
		钢芯铝线	4.5～8	>50		
没有树木或灌木丛植被的平坦或起伏不大的地区	<150	钢绞线		>180	1	1
		钢芯铝线	0.95	>110		
			0.65	>125		
	150～200	铝绞线		>45	2	1
		钢芯铝线	4.5～8	>50		
	>150	铝绞线		40～45	2	1
		钢芯铝线	4.5～8	45～50		
			0.95	<130		
			0.65	<145		
		钢绞线		180～200	1	1
		钢芯铝线	0.95	110～120		
			0.65	125～135		

我国 GB 505045—2010《110kV～750kV 架空输电线路规范》规定，四分裂导线采用阻尼间隔棒时，在档距 500m 及以下可不采取其他防振措施。对水平排列的双分裂导线，其防振措施并未同单导线加以区别，这从国内外实际测振对比和国外规定看都是偏于安全的。

对 500kV 四分裂导线对开阔地形自档距 500m 以上开始安装防振锤，800m 及以下档距每档每子导线安装二个防振锤；1000m 及以下 4 个；大于 1000m 每档每子导线安装 6 个防振锤，这与国外多数不装或少装防振锤相比还是偏于安全的。

分裂导线间隔棒的型式、性能及次档距大小的说明详见第七章金具部分。

六、防振锤安装距离

1. 防振锤安装距离的决定原则

防振锤应安装在靠近振动波的波腹处，才能使防振锤上下滞后振动及锤头回转的幅度加大，从而最大限度地消耗电线振动能量。然而电线谐振的频率是在一个频带范围内变化的。一般在 3～60Hz 振动较为严重，在更高频段由于电线自阻尼作用的显著增大，不会造成危险振动。而在低频情况下，电线的自阻尼作用减弱，防振锤的频率特性也较差，往往是防振设计的危险频段。如果没有取得电线振动的实际密集频率范围，可根据线路引起振动风速的上限及下限值（一般平坦开阔地区的振动下限风速取 0.5m/s；而上限取 5～6m/s），按式（5-99）计算出振动频率范围，并按式（5-101）算出振动的最大、最小半波长，选择能保护该振动频率范围的防振锤，计算防振锤的安装位置，使之在最大及最小波长范围内均能起到防振作用。

2. 防振锤安装距离

（1）安装距离的计算。假定线夹出口是所有振动波的波节，当安装第一个防振锤时，防振锤的安装位置应在线夹出口所有振动波的第一个半波之内。具体的位置应这样考虑：在最长和最短波的情况下，防振锤的位置在第一个半波长内对最长和最短波波节点都有最可能大的相同相角（如 $\theta_{max}=180°-\theta_{min}$），见图 5-32，即安装位置对最大和最小半波具有相同的布置条件，或对最大、最小波腹接近程度相同。依此得出第一个防振锤安装距离 b_1 的计算式式(5-112)，安装距离如图 5-33 中所示。

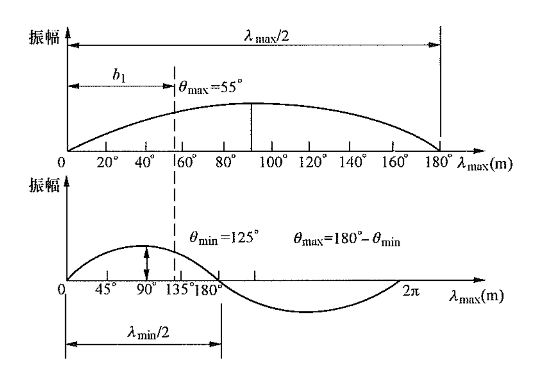


图 5-32　防振锤最佳安装位置图解图

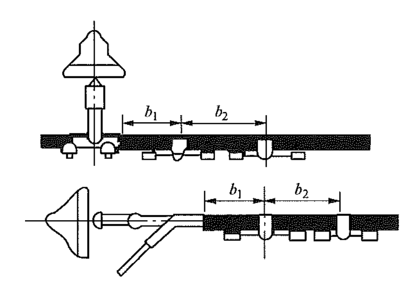


图 5-33　防振锤安装距离示意图

$$b_1=\left(\frac{\lambda_{min}}{2}\times\frac{\lambda_{max}}{2}\right)\bigg/\left(\frac{\lambda_{min}}{2}+\frac{\lambda_{max}}{2}\right)=\frac{1}{1+\mu}\left(\frac{\lambda_m}{2}\right)\quad(5\text{-}112)$$

$$\frac{\lambda_{min}}{2}=\frac{d}{400v_{max}}\sqrt{\frac{T_{max}}{m}};$$

$$\frac{\lambda_{max}}{2}=\frac{d}{400v_{min}}\sqrt{\frac{T_{max}}{m}};$$

$$\mu=\frac{v_{min}}{v_{max}}\times\sqrt{\frac{T_{min}}{T_{max}}};$$

式中　b_1——第一个防振锤距线夹出口的距离，m；

d、m——分别为电线外径，mm；单位长度质量，kg/m；

λ_{min}、λ_{max}——分别为最小及最大振动波长，m；

v_{min}、v_{max}——振动风速的下、上限值，m/s，参见表 5-39 和式（5-106）；

T_{min}、T_{max}——最高和最低气温条件下的电线张力，N。

上式是假定各种振动频率和振动强度出现的概率是相同的，这可能与实际不符，振动的危险性可能多在低频、长波段，这就应该使 b_1 更大一些为好。另外当代表档距（或孤立档档距）很大时，T_{min} 和 T_{max} 相差很小，在使用的档距范围内，用平均运行张力 T_{av} 代替 T_{min}、T_{max} 对 b_1 影响很小。再从式（5-112）中的系数μ值来看，一般在 0.05～0.1 之间。故常将式（5-112）近似简化为下式计算 b_1 甚为方便

$$b_1=(0.9\sim0.95)\times\left(\frac{\lambda_{min}}{2}\right)$$

$$=(2.25\sim2.375)\times\left(\frac{d}{v_{max}}\sqrt{\frac{T_{av}}{m}}\right)\times10^{-3}\ (\text{m})\quad(5\text{-}113)$$

式中　T_{av}——电线平均运行张力，N；

其他符号含义同式（5-112）。

我国过去常用式（5-112）、式（5-113），而且当档距每端安装多个同型号防振锤时，仍依上述原理采用等距安装法，即 $b_1=b_2=b_3$ 等，计算及安装均方便。

苏联计算安装距离 b_1 时，后改为取 $b=\frac{\lambda_{min}}{2}$，对超高压线路取振动上限风速 v_{max}=6m/s，由式（5-112）中的 $\frac{\lambda_{min}}{2}$ 简化可写为

$$b_1\approx\frac{\lambda_{min}}{2}\approx1.3d\sqrt{\frac{T_{av}}{10m}}\times10^{-3}$$

$$\approx0.415d\sqrt{\frac{T_{av}}{m}}\times10^{-3}\ (\text{m})\quad(5\text{-}114)$$

以上三式基本上无大差别，都可使用，即使防振锤置于波节处，因其有回转甩动和摇摆作用仍能起一定的减振作用，而且并非总在 $\frac{\lambda_m}{2}$ 相对应的高频处振动。

（2）不等距安装法。

苏联防振规定，跨越河流及水库，长 500～1500m（山谷宽 800～1500m）的跨越档距，由于在较宽频率范围内有强烈振动，必须依次安装具有不同特性的两个防振锤，第一个防振锤质量大于第二个的质量，并采用不等距安装法，上限风速取 6.5m/s，其计算式为

$$\left.\begin{aligned}b_1&=1.1\times\left(\frac{\lambda_{min}}{2}\right)\\b_2&=0.75\times\left(\frac{\lambda_{min}}{2}\right)\end{aligned}\right\}\quad(5\text{-}115)$$

加拿大 Nigol 等认为（CIGRE-1984：22-07）：当每档安装两个防振锤时，防振锤距各端的安装距离也应不相等。当风速约为 1.5m/s 时，无防振锤的电线将产生最大的振幅。故一侧防振锤应安装在其波腹中心。为避免当频率增加一倍或其他整数倍数时，第一个防振锤处于波节点不能充分发挥作用，故第二个防振锤的安装距离应为第一个防振锤安装距离的 0.4～0.6 倍。由于第二个防振锤是抑制高一倍以上频率的振动，故其重锤可减轻 1.7 倍、钢丝长度也可减短。

英国安装防振锤也采用不等距安装法（各公司不尽相同），在 PLP 公司的计算规定中，当用式（5-99）计算风振频率时，取式中的系数 K=185，振动上限风速取 6.7m/s。其算式为

$$\left.\begin{aligned} s_1 &= 0.7\times\left(\frac{\lambda_{\min}}{2}\right)\approx 1.9\times\left(\frac{d}{v_{\max}}\sqrt{\frac{T_{av}}{m}}\right)\times 10^{-3} \\ s_2 &= 0.6\times\left(\frac{\lambda_{\min}}{2}\right)\approx 1.62\times\left(\frac{d}{v_{\max}}\sqrt{\frac{T_{av}}{m}}\right)\times 10^{-3} \\ s_3 &= 0.9\times\left(\frac{\lambda_{\min}}{2}\right)\approx 2.43\times\left(\frac{d}{v_{\max}}\sqrt{\frac{T_{av}}{m}}\right)\times 10^{-3} \end{aligned}\right\}(\text{m}) \tag{5-116}$$

式中 s_1、s_2 与我国常采用的式（5-112）、式（5-113）不同而 s_3 则接近。

美国电力公司一般安装第一个防振锤时，导线取 $b_1=0.75\times\frac{\lambda_{\min}}{2}$；对地线则取 $0.9\times\frac{\lambda_{\min}}{2}$（认为是照顾地线振动频率高）。第二只防振锤距线夹回转点的距离比一般更远些（通常为2.44m），以针对振动的低频部分加以控制。

七、导线防舞

电线覆冰与环境温度、空气湿度、风速、大气环流或冷暖空气对流等诸多因素相关，是较为复杂的综合物理现象。覆冰分为雨凇、雾凇及冰雪混合物多种类型。输电线路的舞动也分为裸线舞动、电线覆冰舞动等类型。本手册提及的电线舞动是指发生概率较大的覆冰舞动，即电线不均匀覆冰后，在风的激励下所产生的一种低频率、高幅值的自激振动，是一种空气动力失稳的现象。

电线舞动多发于入冬或初春时节，其成因与电线覆冰情况、线路结构参数、地形、风激励有关。当空气湿度较大（90%～95%）时，在一定的环境温度（一般–5～0℃）及风速（一般大于 1m/s）作用下，空气中的过冷却水滴极易在电线上形成覆冰，迎风侧较厚，背风侧较薄，这种翼状覆冰在风力作用下致使电线发生椭圆轨迹舞动。线路走向与冬季主导风向夹角大于45°的区段，发生舞动的可能性更大。山谷、峰口、地势开阔平坦地区也更易发生舞动。

国外对电线舞动的研究早于 20 世纪 30 年代，如发生舞动危害的日本、加拿大、苏联等国家均进行了大量风洞试验，通过架设试验线路积累了一定的观测数据。我国于 20 世纪五六十年代就发生过舞动灾害，随着近年来超高压、特高压线路的建设增多，线路舞动现象时有发生。输电线路导、地线覆冰后如发生舞动、脱冰跳跃现象，会给电力系统的安全、稳定运行带来极大危害，会造成电线断线、金具及零部件和绝缘子的损坏、相间闪络、继电保护动作，严重时甚至造成线路跳闸断电、杆塔倾覆，给居民生活用电、企业安全生产带来影响。

现行防舞措施概括起来大约可分为三大类：其一，从气象及地形条件考虑，避开易于形成舞动的覆冰区域及线路走向；其二，从机械与电气安全的角度考虑，提高线路抵抗舞动的能力；其三，从改变与调整导线系统的参数出发，采取各种防舞装置与措施，抑制舞动的发生。

（一）易舞动区的特征

在路径方案选择时，若条件允许，尽可能合理选择路径走向，以避免线路舞动的发生。若难于避免时，则应对线路易舞动区做出切合实际的调查，以便在设计时采用必要的防舞措施。有鉴于此，必须对易舞动区的特征有所了解。

一般来讲，易舞动区的特征主要体现在地形及气象两个方面。

（1）地形方面。经验表明，舞动一般多发生在平原开阔地带。地形平坦开阔，周围屏蔽较少，风速比较稳定，风向比较固定，有利于导线舞动的发生。

（2）覆冰情况。调查表明，舞动一般发生在导线不均匀覆冰条件下。常见覆冰厚度见表 5-47。最大覆冰厚度可达 25～30mm。

表 5-47　　导线舞动覆冰厚度统计表

资料来源	覆冰统计年限	舞动次数与单侧覆冰厚度（mm）			
		5 以下	5～10	10～20	20 以上
苏联	1982～1985	70	46	64	32
辽宁舞动	2009～2010	83	59	45	
合计		153	105	109	32

（3）舞动风速。据统计，舞动风速一般在 5～20m/s，也有在 20m/s 以上发生者。

（4）舞动风向。国内外绝大多数导线舞动通报中，风向与线路轴线间的夹角在 45°～90°之间。

（5）舞动气温。据苏联舞动统计表明，70%的舞动发生在环境温度 0～–5℃；25%左右的舞动发生在环境温度–6～15℃。也曾测得有四次舞动发生在气温–27℃，–30℃及–37℃（两次），而且在–30℃时，肉眼观察未发现导线复冰。

国内导线舞动气温与苏联基本相同，多数发生在0～–5℃。

以上述及易舞动地区的地形、气象等方面的一些

主要特征。在进行新建线路设计时，必须进行必要的沿线舞动情况及气象、地形条件的调查。由于舞动的最主要条件是线路覆冰和主导风向，因此，应特别注意对冬、春季节（11 月至次年 3 月）气象条件的调查。对冬季不可能覆冰的地区则无需考虑线路防舞设计。

（二）提高线路抵抗舞动的措施

1. 塔位布置

从塔位布置上提高线路抗舞的措施一般有：

（1）在易舞动地区适当缩小档距，降低杆塔高度；

（2）线路跨越主干铁路、高速公路等重要设施宜采用耐—直—直—耐跨越方式，尽量避免耐张塔跨越。

2. 线路部件机械强度设计

从线路部件机械强度设计上提高线路抗舞能力的措施一般采用如下几项：

（1）在舞动频发地区的杆塔设计上适当提高杆塔抵抗舞动产生动荷载的能力：

1）可通过加大铁塔底宽和顶宽来提高输电铁塔振动的可靠性；

2）线路舞动时将产生巨大的动态荷载，据估计，导线舞动时产生的最大动态张力可达静态张力的 2 倍。线路加装防舞器后，导线舞动产生的动态张力可降至静态张力的 1.5 倍以下。杆塔强度可按此荷载进行验算，以保证导线舞动不会导致杆塔倾倒。

（2）适当提高耐张塔导线挂点、横担和塔身连接处等重要部位的构件强度、螺栓强度或增加螺栓数量。

（3）加强螺栓的防松性能。耐张塔及邻近耐张的直线杆塔宜全塔采用防松螺栓。

（4）对经过舞动频发及强舞动地区线路的金具及绝缘子设计安全系数应适当提高。提高幅度应视可能出现的舞动强度而定，一般可将金具设计的安全系数提高至 3.0～4.0；绝缘子的安全系数提高至 3.5～4.5。

（5）可增大绝缘子串的质量以降低张力变化引起的振幅。

（6）可采用耐磨金具，亦可采用具有抗舞性能的金具。

3. 杆塔塔头布置设计

欲从杆塔塔头布置上提高线路抗舞能力，在设计上一般应考虑如下几个方面：

（1）在舞动区段内可适当增加相间距离。直线塔可考虑采用 V 型绝缘子串，以限制导线舞动幅值；

（2）导线舞动时产生椭圆轨迹运动，要保证舞动过程中不产生相间及相对地闪络，为此，相间及相对地最小间隙按工频（工作）电压考虑，其数值应不小于表 5-48 所列数值。

表 5-48　　各电压等级的最小电气间隙

电压等级（kV）	110	220	330	500	±500	750	±660	±800	1000
相间间隙（m）	0.45	0.95	1.6	2.3（2.1）	2.8（2.6）	4.2（3.9）	3.8	4.6（4.2）	5.0（4.7）
相对地间隙（m）	0.25	0.55	0.9	1.3（1.2）	1.4（1.3）	2.4（2.25）	1.9	2.3（2.1）	2.9（2.7）

注　表中所列数值为海拔 1000m 值，括号内数值为海拔 500m 值。

导线舞动的椭圆轨迹推荐两种方法，设计者可酌情选用。

方法一：苏联推荐的导线舞动轨迹绘制方法见图 5-34 及表 5-49。

表 5-49　　导线舞动轨迹参数表

计算参数名称	图 5-31 中使用的符号	不同电压等级线路的参数值				
		330kV 架空线路		500kV 架空线路	750kV 架空线路	1150kV 及 1500kV 架空线路
		有中等程度舞动的地区	有频繁和强烈舞动的地区			
椭圆长轴	a	$0.675f_r$	$0.9f_r$	f_r	f_r	f_r
椭圆短轴	b					
f_r≤4m		$0.25f_r$	$0.45f_r$	$0.25f_r$	$0.25f_r$	$0.5f_r$
f_r=16m		$0.125f_r$				
（对中间值用线性插值法确定）						
导线偏离角	α_{np}	10°	15°	10°	10°	10°
地线偏离角	α_{TP}	15°	15°	15°	15°	15°
椭圆长轴与垂线的夹角	α_{gn}	5°	15°	5°	5°	5°
导线最小振幅	a_1	$0.2f_r$	$0.2f_r$	$0.2f_r$	$0.2f_r$	$0.2f_r$
导线最大振幅	a_2	$0.8f_r$	$0.8f_r$	$0.8f_r$	$0.8f_r$	$0.8f_r$
导线、地线之间的最小允许距离	δ					
不同相导线之间的最小允许距离	δ				—	—

注　f_r—导线最大弧垂。

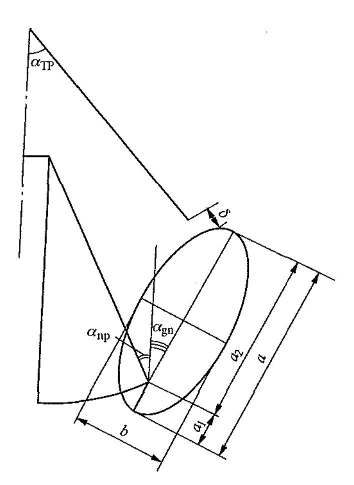


图 5-34 按导线舞动条件校验杆塔外形尺寸

方法二：DL/T 5485—2013《110kV—750kV 架空输电线路大跨越设计技术规程》条文说明中给出了导地线舞动的电气间隙计算方法，如图 5-35 所示。

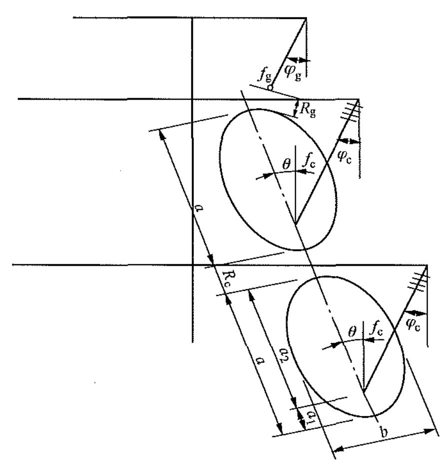


图 5-35 导线舞动时的电气间隙

φ_g —地线风偏角，最小取 0°，最大可比导线风偏角大 5°；

f_g—地线弧垂，m；φ_c —导线风偏角，取 10°～15°；

f_c—导线弧垂，m；

θ —长轴 a 与垂线间的夹角，取 5°～10°；

a_1—（0.2～0.25）a；a_2—（0.8～0.75）a；b—0.4a；

R_g—导线舞动椭圆轨迹距地线弧垂的电气绝缘距离，应满足表 5-48 中相对地间隙值要求；

R_c—两相导线椭圆舞动轨迹间的电气绝缘距离，应满足表 5-48 中相间间隙值要求

舞动振幅 a 应按式（5-117）计算

$$a=\eta v_w \sin\beta / f \qquad (5\text{-}117)$$

式中 a ——舞动振幅（椭圆轨迹的长轴），m；

v_w——风速，m/s；

η ——舞动的气象系数，一般取 η =0.15；

β ——风向与导线轴线的夹角，（°）；

f——舞动频率；Hz。

舞动频率 f 可用式（5-118）进行估算

$$f=\frac{n}{2l}\sqrt{\frac{T}{m}} \qquad (5\text{-}118)$$

式中 l ——档距，m；

T ——导线张力，N；

m——导线单位长度质量，kg/m；

n ——半波数，即舞动的阶次。对档距 l<200m 的档，可取 n=1，或 2；对档距在 200m<l<500m，可取 n=2 或 3；对档距在 l>500m，可取 n=2 或 3 或 4。

（三）防舞动装置

目前输电线路常用的防舞动装置有：相间间隔棒、线夹回转式间隔棒、双摆防舞器、失谐摆及偏心重锤等。

1. 防舞装置选择原则

35～220kV 线路相导线水平排列时可采用线夹回转式间隔棒、双摆防舞器、失谐摆及偏心重锤等，相导线三角排列或垂直时宜采用相间间隔棒，也可采用线夹回转式间隔棒、双摆防舞器、失谐摆及偏心重锤等。

330～750kV 同塔双（多）回常规线路宜采用线夹回转式间隔棒、相间间隔棒、也可采用双摆防舞器、失谐摆及偏心重锤等，不同回路可采用不同的防舞装置。单回线路宜采用线夹回转式间隔棒、失谐摆、双摆防舞器及偏心重锤。紧凑型输电线路采用相间间隔棒。

特高压输电线路宜采用线夹回转式间隔棒或双摆防舞器。

2. 线夹回转式间隔棒

线夹回转式间隔棒采取不等距、不对称的布置方式。最大次档距不大于 50m，端次档距不大于 25m，平均次档距 45m 左右。通常，将间隔棒的半数夹头采用回转式，且应使得回转式夹头朝向一致。

3. 相间间隔棒

相间间隔棒的安装位置，应尽量将相间间隔棒安装在舞动常发波形的波腹处附近。避免将相间间隔棒安装在同一断面内。采用间距可调式连接金具。

相间间隔棒安装位置应结合间隔棒的位置安装。

相间间隔棒布置方式可参见表 5-50～表 5-52。

表 5-50　　500kV 同塔双回垂直排列线路相间间隔棒布置方法

档距（m）	数量（只）	布置位置（m，与小号侧的距离）	
		上相-中相	中相-下相
$l \leqslant 300$	2	$\frac{1}{3}l$	$\frac{2}{3}l$
$300 < l \leqslant 500$	3	$\frac{1}{4}l$、$\frac{3}{4}l$	$\frac{1}{2}l$
$500 < l \leqslant 800$	5	$\frac{2}{9}l$、$\frac{1}{2}l$、$\frac{7}{9}l$	$\frac{2}{5}l$、$\frac{3}{5}l$
$l > 800$	7	$\frac{1}{7}l$、$\frac{2}{5}l$、$\frac{3}{5}l$、$\frac{7}{8}l$	$\frac{1}{4}l$、$\frac{1}{2}l$、$\frac{3}{4}l$

表 5-51　　500kV 紧凑型线路相间间隔棒布置方法

档距（m）	数量（只）	布置位置（m，与小号侧的距离）		
		左上相-下相	左上相-右上相	右上相-下相
$l \leqslant 300$	2	$\frac{1}{3}l$	/	$\frac{2}{3}l$
$300 \leqslant l < 500$	3	$\frac{1}{4}l$	$\frac{1}{2}l$	$\frac{3}{4}l$
$500 \leqslant l < 700$	5	$\frac{2}{9}l$、$\frac{3}{5}l$	$\frac{1}{2}l$	$\frac{2}{5}l$、$\frac{7}{9}l$
$700 \leqslant l < 1000$	6	$\frac{1}{7}l$、$\frac{4}{7}l$	$\frac{1}{4}l$、$\frac{5}{7}l$	$\frac{2}{5}l$、$\frac{7}{8}l$
$l \geqslant 1000$	7	$\frac{1}{7}l$、$\frac{4}{7}l$	$\frac{1}{4}l$、$\frac{1}{2}l$、$\frac{5}{7}l$	$\frac{2}{5}l$、$\frac{7}{8}l$

注　该布置方案同时综合考虑了防风偏，水平两相间应采用刚性较大的复合绝缘子。

表 5-52　　220kV 及以下电压等级垂直排列线路相间间隔棒布置方法

档距（m）	数量（只）	布置位置（m，与小号侧的距离）	
		上相-中相	中相-下相
$100 \leqslant l < 400$	2	$\frac{1}{3}l$	$\frac{2}{3}l$
$400 \leqslant l < 500$	3	$\frac{1}{4}l$、$\frac{3}{4}l$	$\frac{1}{2}l$
$500 \leqslant l < 600$	4	$\frac{2}{9}l$、$\frac{3}{5}l$	$\frac{2}{5}l$、$\frac{7}{9}l$
$600 \leqslant l < 700$	5	$\frac{2}{9}l$、$\frac{1}{2}l$、$\frac{7}{9}l$	$\frac{2}{5}l$、$\frac{3}{5}l$

4. 双摆防舞器

档距小于 700m 时，采用三点布置原则，分别置于：$2/9l$、$1/2l$、$7/9l$ 处，并分别以这三点为中心对称布置。档距大于 700m 时，采用四点布置原则，分别置于：$2/9l$、$7/16l$、$9/16l$、$7/9l$ 处，并分别以这四点为中心对称部署。每处每个双摆防舞器安装间距为 7m 左右。

双摆质量控制在档内导线总质量的 7%左右。在双摆防舞器安装位置的 ±10m 范围内不需安装线路子导线间隔棒。

5. 失谐摆

失谐摆主要应用于单导线防舞。摆锤总质量不超过档内导线质量的 7%，摆长不超过 600mm，安装位置参考双摆防舞器布置方案。

6. 偏心重锤

偏心重锤的重锤总质量应为档内导线质量的 8%左右。重锤交叉布置在间隔棒上。布置方式参考双摆防舞器。

第六章

对电信线路的影响及其防护

输电线路对电信线路的危害影响来源于输电线路的电压和电流所建立的电场、磁场和入地电流产生的地电位升。其影响从类别分有危险影响和干扰影响；从性质分有电流产生的磁影响（或称感性耦合影响）、电压产生的电影响（或称容性耦合影响）和入地电流产生的地电位升影响（或称阻性耦合影响）。

本章将对三相对称交流架空输电线路（侧重中性点直接接地系统）以及直流架空输电线路对电信线路的影响允许值、影响计算方法及其防护设计进行介绍。

第一节　基　础　知　识

通信保护设计的影响源为架空输电线路，被影响对象为电信线路，架空输电线路通过电磁感应，对其附近的电信线路产生影响。本节主要介绍架空输电线路、电信线路、输电线路对电信线路的影响及电信线路与输电线路接近等有关基础知识，并对相关术语、定义进行说明。

一、架空输电线路

架空输电线路按传输电能的性质分为交流架空输电线路和直流架空输电线路。

1. 交流架空输电线路

交流系统一般分为中性点不直接接地系统和中性点直接接地系统。变压器的中性点不接地或经消弧线圈、高阻抗接地的系统，称为中性点不直接接地系统。当该系统一相发生接地故障时，而另外两相的绝缘没有遭到破坏，因此还可以继续短时运行一段时间。一般 66kV 及以下系统采用中性点不直接接地方式。变压器的中性点直接或经低阻抗接地的系统，称为中性点直接接地系统，当该系统发生接地故障时，会有较大的电流通过接地点，为避免烧坏电气设备，继电保护会立即动作，使开关跳闸，消除故障，一般 110kV 及以上系统采用中性点直接接地方式。中性点直接接地系统的输电线路，故障率低，一相接地短路故障电流持续时间短，大多数情况小于 0.2s，不超过 0.5s，称为高可靠输电线路。

交流架空输电线路按架设导线的回路数划分为单回路、同塔双回路和同塔多回路；三相导线在杆塔上的排列方式有三角排列、垂直排列和水平排列。超高压及以上输电线路多采用相分裂导线，一般 110kV 采用单极或两分裂，220～330kV 采用两或四分裂，500kV 采用四或六分裂，750kV 采用六分裂，1000kV 采用八分裂。

2. 直流架空输电线路

直流输电是由两个换流站与连接它们的直流线路组成。直流输电运行方式主要有双极—大地回路、单极—大地回路、双极—金属线回路和单极双线回路等方式，常用的双极—大地回路，是由正极导线和负极导线组成，通过接地极和接地极线路以大地作为电流回路，称为双极单回路。单极—大地回路一般只有在直流工程投运初期或检修期间才采用。以金属线作为电流回路的双极—大地和单极双线回路方式采用的较少。直流架空输电线路接地短路故障切除时间极短，一般在 0.01～0.045s 范围内，亦属于高可靠输电线路。

直流线路也有单极线路、双极单回路、同塔双回路等，两级导线采用水平排列或垂直排列方式，极导线采用分裂导线。一般±400～±660kV 采用四分裂，±800kV 采用六或八分裂，±1100kV 采用八分裂。

二、电信线路

电信线路按传输介质不同可分为架空明线、电缆和光缆；按敷设方式可分为架空、直埋、沟道（或管道）及海底敷设等。按应用区域不同分为长途通信线路、市话线路和农村线路等。按传输信号不同又分为电话线路、电报线路、有线广播线路、有线电视线路、铁路信号线路等。

1. 架空明线

架空明线的导线一般采用裸露的铁线、铝线或铜线对，采用横担或弯钩型式架设，普遍采用的线杆型式有四线担、八线担和弯钩，或采用线担与弯钩混合杆型。语音信息能直达通话的最大距离取决于线路的

固有衰减常数，当语音信息无法直达时需设增音机。一般 3.0mm 铜线音频通信直达距离约为 300km，4.0mm 铁线音频通信直达距离约为 75km。采用增音、载波等技术后，架空明线的话路容量可达 3 路、12 路和高 12 路。

2. 电缆

通信电缆按结构型式分为市话电缆、对称电缆和同轴电缆，一般由通信导体、绝缘层、护套、铠装及外护层组成。市话电缆的通信导体为铜芯线对，线芯直径一般为 0.4～0.9mm，对数在 5～2400 对之间，外被铅护套、塑料护套或铝塑综合护套等。市话电缆一般用在端局与用户电话机之间，长度一般在 6km 以内，市话系统多采用局端集中供电、正极接地运行方式。对称电缆的通信导体是由多个扭绞在一起的铜芯或铝芯的线组组成，芯线直径一般为 0.8～1.8mm，采用二线制或四线制传输；同轴电缆则是由两个同心的导体、而导体和屏蔽层又共用同一轴心的电缆；这两种电缆一般采用铅包或铝包金属护套，对于地埋敷设的，外面还要包裹钢带或钢丝铠装。对称电缆和同轴电缆多用于局间长途线路，传输的是高频信号，由于信号电平衰减较大，线路上需设置多个增音机。无人站增音机电源供电系统一般采用“导线—导线”制或“导线—大地”制，均采用直流、定流、串联供电，电源由有人站输出，采用对端均压供电或中间环回供电方式。

3. 光缆

光缆分为金属光缆和非金属光缆，一般由光纤纤芯、加强构件、护套、铠装及外护层组成。金属光缆一般含有金属加强芯或含有供通信或供电的金属线对。长途光缆的中继站供电系统与电缆供电系统相类似。

4. 铁路信号线

铁路信号线是传输铁路信号系统信息的电缆及架空明线，如继电半自动闭塞、自动闭塞方向电路、遥控线路、遥信线路及自动闭塞区间的轨道电路。继电半自动闭塞线路闭塞区间为相邻两车站，均为双线线路。自动闭塞方向电路是自动闭塞区段内，同一铁路上列车双方向运行时，用以确定列车运行方向的电路（一般与铁路通信线同路由）。轨道电路是利用铁路的轨道作为导体组成的，用以检查该段铁路上有无列车占用、传递列车占用信息及实现地面与列车间信息传递的通路，自动闭塞轨道电路的长度一般为 1～2.5km。铁路分为电气化铁路和非电气化铁路，对于电气化铁路，可不考虑输电线路对铁路信号系统的影响。

三、输电线路对电信线路的影响

输电线路对电信线路的影响从类别分有危险影响和干扰影响。电信线路遭受输电线路感应而产生的电压和电流，足以构成危害通信线路运行和维护人员的生命安全、损坏电信线路或设备、引起构筑物火灾，以及引起铁路信号设备的误动而危及行车安全等影响，称为危险影响。电信线路遭受输电线路电感应和磁感应产生的电压和电流足以影响电信回路的正常运行，即在电话回路中引起杂音，降低传输质量，使电报信号失真等影响，称为干扰影响。

输电线路对电信线路的影响从性质分有电流产生的磁影响（或称感性耦合影响）、电压产生的电影响（或称容性耦合影响）和入地电流产生的地电位升影响（或称阻性耦合影响）。由输电线路和大地中的电流通过电感耦合对电信线路产生的影响，称为感性耦合影响。由输电线路的电压通过电容耦合对电信线路产生的影响，称为容性耦合影响。流过输电线路杆塔接地装置的短路电流，在流入、流出大地的区域与远方大地之间产生电位差，使大地电位升高，通过大地电阻耦合对电信局（站）接地装置、地埋电缆、地埋光缆产生的影响，称为阻性耦合影响。

由危险影响而在电信线路上产生纵电动势和对地电压，在触及通信线的人体内产生电流，在短路电流入地点产生地电位升等。输电线路和大地中的电流在电信线路上任意两点间所感应的电位差，称为磁感应纵电动势（简称纵电动势）；输电线路和大地中的电流在电信线路上任一点所感应的对地电位，称为磁感应对地电压（简称对地电压）；当人体触及位于输电线路高压电场内对地绝缘的电信线路导线时，由电感应引起的流经人体的电流，称为电感应人体电流。电力网故障电流经变电站接地网或输电线路杆塔接地装置流入大地时，使该区域内地电位升高，在电缆金属护套与芯线间（光缆金属护套与金属回线）、无金属护套电缆的芯线与远处接地（无金属护套光缆金属回线或金属加强芯）间所形成的电位差以及电信局（站）接地装置上的电位升高，统称为地电位升。

由干扰影响在电信线路上产生噪音计电压和噪音计电动势。在音频电话回路的远端接入一个与该回路特性阻抗相等的纯电阻，在近端连接一个 600Ω 纯电阻（如果回路特性阻抗不是 600Ω 时，利用变量器进行匹配），这时在 600Ω 纯电阻上用噪声计测得的电压，即为噪声计电压；音频电话回路两端的噪声计电压绝对值之和称为噪声计电动势。

四、电信线路与输电线路接近

电信线路和输电线路的相对位置，使输电线路的电磁感应在电信线路上可能产生危险和干扰时称为接近。接近分为平行接近和斜接近。两线路接近的距离变化不超过其算术平均值的 5%时，称为平行接近；当超过 5%，且两线路接近距离呈线性增加或减少时，称

为斜接近。电信线路与输电线路接近如图 6-1 所示。

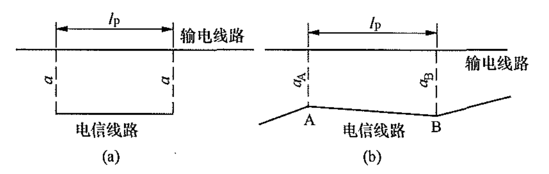


图 6-1 输电线路与电信线路接近示意图

（a）平行接近；（b）斜接近

在电信线路中心线上任一点引申到输电线路中心线并与输电线路方向垂直的距离，称为该点的输电线和电信线的接近距离，如图 6-1 中的 a 值。代数接近距离为假定输电线路一侧的接近距离定为正值时，则另一侧为负值；带有正负符号的接近距离，称为两线路间在某一点上的代数距离。斜接近段两端接近距离的几何平均值，称为斜接近段的等值接近距离（a）。在计算时，每个斜接近段两端距离的比值应满足 $\frac{1}{3}\leqslant\frac{a_A}{a_B}\leqslant 3$，否则应划分若干线段，$a=\pm\sqrt{a_A a_B}$。电信线路接近段在输电线路上的投影称为接近段长度（l_p），如图 6-1 所示。

第二节 短路电流计算

电力系统正常运行以外的一切相与相间或相与地间的连接称为短路故障。如中性点直接接地系统的相间短路、一相或多相接地短路，中性点不直接接地系统的相间短路、一相接地短路和两相在不同地点同时接地短路等。经统计，输电线路单相接地短路故障概率最大，两相接地短路故障次之。中性点直接接地的三相对称交流输电线路发生单相接地短路和中性点不直接接地三相对称交流输线路发生两相不同地点同时接地短路时的零序电流计算，习惯称短路电流计算，是确定磁危险影响的重要数据。

短路电流计算范围是依据电力系统专业提供的 5～10 年远景电力系统阻抗图，通过网络简化，计算零序电流，绘制成接地短路电流曲线。短路电流计算方法采用对称分量法，各电气量的计算采用标幺制。

一、对称分量法

三相对称交流输电线路发生单相或两相接地短路时，对称系统的对称性遭到破坏，对称三相电压和电流的大小和方向都变成不对称了，所以这类短路称为不对称短路。

对称分量法就是将任意一组不对称的三相分量分解成为三组对称分量的方法。如以 $\dot{F}_{a1}$、$\dot{F}_{b1}$、$\dot{F}_{c1}$ 表示大小相等、相位差 120° 的正序分量；以 $\dot{F}_{a2}$、$\dot{F}_{b2}$、$\dot{F}_{c2}$ 表示大小相等、相位差 120° 的负序分量；以 $\dot{F}_{a0}$、$\dot{F}_{b0}$、$\dot{F}_{c0}$ 表示大小相等、方向相同的零序分量，如图 6-2 所示，任意一组不对称的三相分量 $\dot{F}_a$、$\dot{F}_b$、$\dot{F}_c$ 可表示为

$$\left.\begin{aligned}\dot{F}_a&=\dot{F}_{a1}+\dot{F}_{a2}+\dot{F}_{a0}\\\dot{F}_b&=\dot{F}_{b1}+\dot{F}_{b2}+\dot{F}_{b0}\\\dot{F}_c&=\dot{F}_{c1}+\dot{F}_{c2}+\dot{F}_{c0}\end{aligned}\right\}\tag{6-1}$$

如令 $1=e^{i0^\circ}$；$a=e^{i120^\circ}$；$a^2=e^{i240^\circ}$，“a”称为运算子，则若以 A 相为基准相，公式（6-1）可写成

$$\left.\begin{aligned}\dot{F}_a&=\dot{F}_{a1}+\dot{F}_{a2}+\dot{F}_{a0}\\\dot{F}_b&=a^2\dot{F}_{a1}+a\dot{F}_{a2}+\dot{F}_{a0}\\\dot{F}_c&=a\dot{F}_{a1}+a^2\dot{F}_{a2}+\dot{F}_{a0}\end{aligned}\right\}\tag{6-2}$$

解式（6-2）可得

$$\left.\begin{aligned}\dot{F}_{a1}&=\frac{1}{3}(\dot{F}_a+a\dot{F}_b+a^2\dot{F}_c)\\\dot{F}_{a2}&=\frac{1}{3}(\dot{F}_a+a^2\dot{F}_b+a\dot{F}_c)\\\dot{F}_{a0}&=\frac{1}{3}(\dot{F}_a+\dot{F}_b+\dot{F}_c)\end{aligned}\right\}\tag{6-3}$$

这就说明，用式（6-3）可将任意一组不对称的三相分量分解成为正序、负序、零序三组对称分量，如图 6-2 所示。

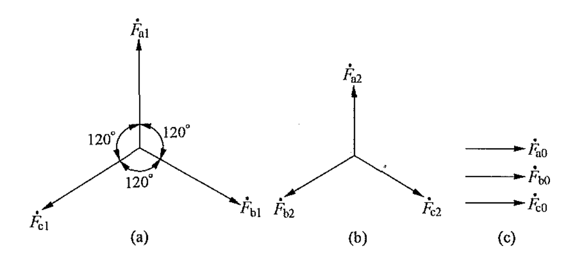


图 6-2 对称分量的正序、负序、零序分量

（a）正序分量；（b）负序分量；（c）零序分量

二、标幺制

短路电流计算普遍采用标幺制，即将各电气量预先归算到一种基准情况，因而对系统中不同电压等级的各个元件可直接进行运算。

如以 I_d、U_d、S_d、X_d 分别表示基准电流、基准线电压、基准容量、基准电抗，则在纯电抗电路中四个电气量间的关系为

$$X_d=\frac{U_d}{\sqrt{3}I_d}\tag{6-4}$$

$$S_d=\sqrt{3}U_d I_d\tag{6-5}$$

所以，只要任意选定两个基准量，另外两个基准量也就确定了。基准量确定后各电气量的标幺值可表示为

$$I_* = \frac{I}{I_d} \tag{6-6}$$

$$U_* = \frac{U}{U_d} \tag{6-7}$$

$$S_* = \frac{S}{S_d} \tag{6-8}$$

$$X_* = \frac{X}{X_d} = X\frac{S_d}{U_d^2} \tag{6-9}$$

注：*表示各电气量的标幺值，在使用习惯后往往省略。标幺值是个无名量，是实际量与基准量的比值（两量要采用相同单位）。

通常，首先取定基准容量和基准电压。为便于计算基准容量一般取 100MVA 或 1000MVA，基准电压一般取各电压级的平均电压，见表 6-1。

表 6-1　各电压级的平均电压

标称电压（kV）	35	66	110	220	330	500	750	1000
平均电压（kV）	37	69	115	230	345	525	785	1050

因此，在 S_d=100MVA 时各电压级的基准电流见表 6-2。

表 6-2　S_d=100MVA 各级电压基准电流

平均电压（kV）	37	69	115	230	345	525	785	1050
基准电流（A）	1560	837	502	251	167	110	74	55

架空输电线路的正序电抗近似值见表 6-3。

表 6-3　架空输电线路正序电抗近似值

电压（kV）	导线分裂数	正序电抗 X_1（Ω/km）	
		单回输电线路	同塔双回输电线路
110 及以下	1	0.4	0.19
220	1	0.4～0.42	0.20
220～330	2	0.3～0.33	0.15
500	3	0.29	0.14
	4	0.27	0.13
750	4	0.29	0.14
	6	0.27	0.13
1000	8	0.26	0.12

注　以上电抗值为近似数值，实际值应根据工程的回路数、杆塔型式、塔头尺寸以及导线排列方式、型号、分裂根数、分裂间距等参数，按第三章第一节中的电抗公式通过计算确定。

架空输电线路的零序电抗与零序电流在地中和架空地线中的分布情况有关，计算比较复杂，但在短路电流的实用计算中，一般可采用表 6-4 数值。

表 6-4　架空输电线路零序电抗

架空地线类型	单回输电线路	同塔双回输电线路（每个回路值）
无架空地线	$3.5X_1$	$5.5X_1$
钢质架空地线	$3.0X_1$	$4.7X_1$
良导体架空地线	$2.0X_1$	$3.0X_1$

35～1000kV 架空输电线路（具有钢质架空地线），在 S_d=100MVA 时，各电压级每千米的电抗标幺值见表 6-5。

表 6-5　S_d=100MVA 具有钢质地线架空输电线路各电压等级每千米电抗标幺值

平均电压（kV）		37	69	115	230	230*	345	525	785	1050
单回输电线路	正序电抗（Ω/km）	0.4	0.4	0.4	0. 42	0.33	0.3	0.27	0.27	0.26
	正（负）序电抗标幺值	0.029	0.0084	0.003	0.000794	0.000624	0.000252	0.000098	0.000044	0.000024
	零序电抗标幺值	0.087	0.0252	0.009	0.00238	0.00187	0.000756	0.000294	0.000132	0.000072
同塔双回输电线路	正序电抗（Ω/km）	0.19	0.19	0.19	0.20	0.15	0.15	0.13	0.13	0.12
	正（负）序电抗标幺值	0.0139	0.0040	0.00144	0.000378	0.000284	0.000126	0.000047	0.000021	0.000011
	零序电抗标幺值	0.0653	0.0188	0.00677	0.001777	0.001335	0.000592	0.000221	0.000099	0.000052

*　双分裂导线参数。

三、网络简化

系统阻抗图实际只给出了正（负）序和零序网络两部分，这是因为在近似计算中，可认为系统中各元件的正序电抗与负序电抗相等，而且只取各元件的电抗分量，以避免繁杂的复数运算。

网络简化的目的，就是将复杂的正（负）序和零序网络利用电路计算的串联、并联及星形—三角形变换，简化成为只具有一个或几个等效电抗，其一端为电源点，另一端为短路点的综合等效电路。计算常用公式见表 6-6。

表 6-6 常用网络变换的基本公式

变换名称	变换前网络	变换后等效网络	等效网络的阻抗	变换前网络中的电流计算公式
串联			$X_\Sigma = X_1 + X_2 + \cdots + X_n$	$\dot I_1 = \dot I_2 = \cdots = \dot I_n = \dot I$
并联			$X_\Sigma = \dfrac{1}{\dfrac{1}{X_1}+\dfrac{1}{X_2}+\cdots+\dfrac{1}{X_n}}$	$\dot I_n = \dfrac{X_\Sigma}{X_n}\dot I$
多个有源支路并联			$E_\Sigma = X_\Sigma\left(\dfrac{\dot E_1}{X_1}+\dfrac{\dot E_2}{X_2}+\cdots+\dfrac{\dot E_n}{X_n}\right)$ X_Σ 值同上	$\dot I_n = \dfrac{\dot E_n - \dot U}{X_n}$ $\dot I = \dfrac{\dot E_\Sigma - \dot U}{X_\Sigma}$
三角形变星形			$X_L = \dfrac{X_{ML}X_{LN}}{X_{ML}+X_{LN}+X_{NM}}$ $X_M = \dfrac{X_{NM}X_{ML}}{X_{ML}+X_{LN}+X_{NM}}$ $X_N = \dfrac{X_{LN}X_{NM}}{X_{ML}+X_{LN}+X_{NM}}$	$\dot I_{ML} = \dfrac{\dot I_M X_M - \dot I_L X_L}{X_{ML}}$ $\dot I_{LN} = \dfrac{\dot I_L X_L - \dot I_N X_N}{X_{LN}}$ $\dot I_{NM} = \dfrac{\dot I_N X_N - \dot I_M X_M}{X_{NM}}$
星形变三角形			$X_{ML} = X_M + X_L + \dfrac{X_M X_L}{X_N}$ $X_{LN} = X_L + X_N + \dfrac{X_L X_N}{X_M}$ $X_{NM} = X_N + X_M + \dfrac{X_N X_M}{X_L}$	$\dot I_L = \dot I_{LN} - \dot I_{ML}$ $\dot I_N = \dot I_{NM} - \dot I_{LN}$ $\dot I_M = \dot I_{ML} - \dot I_{NM}$
多星形变为对角连接的网形			$X_{AB} = X_A \cdot X_B \cdot \Sigma\dfrac{1}{X}$ $X_{BC} = X_B \cdot X_C \cdot \Sigma\dfrac{1}{X}$ … 式中 $\Sigma\dfrac{1}{X} = \dfrac{1}{X_A}+\dfrac{1}{X_B}+\dfrac{1}{X_C}+\dfrac{1}{X_D}$	$\dot I_A = \dot I_{AC} + \dot I_{AB} - \dot I_{DA}$ $\dot I_B = \dot I_{BD} + \dot I_{BC} - \dot I_{AB}$ …

网络简化要求：

（1）通过串联要求做到至少减少一个元件。

（2）通过并联要求做到至少减少一个支路。

（3）通过星形—三角形变换要求做到减少一个电源点或将闭式网络变成开式网络，在不太复杂的网络中，三角形变换为星形是基本的简化内容。

（4）变电站变压器的接地点应视为供出零序电流的电源。

（5）正（负）序网络中的电源点均视为等电位点，零序网络中的接地点均为零电位点，因此在简化时都可拆开或合并。

（6）网络简化的次序应在保留所需计算输电线路

X_L 支路的情况下进行，这样，任何复杂网络，在两端供电的情况下均可简化为如图 6-3 所示两种形式的等效网络。至此，必须取定短路点，才能达到进一步将网络最终简化成为只具一个等效电抗的综合等效电路。

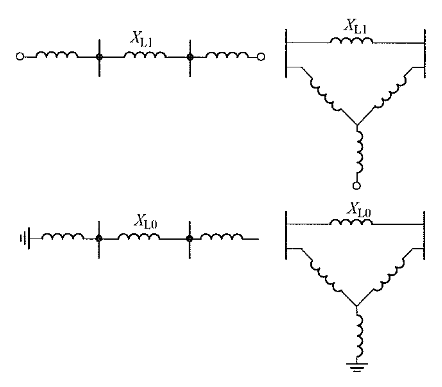


图 6-3 简化为保留所需计算输电线路的等效电路

（7）对于单独架设的两回平行输电线路，由于回路间存在着互感作用，每个回路的零序电抗要有所增大，当需要考虑这种影响时，可按图 6-4 所绘曲线进行计算。

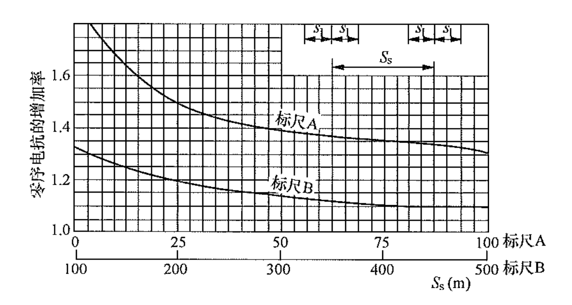


图 6-4 平行线路零序电抗增加率与线路间距离 S_s 的关系曲线

注：图中 s_1 为单回输电线路中心与边导线间水平距离，S_s 为两个单回输电线路中心间水平距离；当两回路间水平距离在 100m 以下时采用标尺 A，水平距离在 100～500m 时采用标尺 B。

四、短路电流计算

（一）接地点总电流

（1）中性点直接接地的三相对称交流输电线路发生单相接地短路时，流经接地点的总的零序电流即接地短路电流按下式计算

$$I_s=\frac{3}{X_1+X_2+X_0}I_d=\frac{3}{2X_1+X_0}I_d \quad (6\text{-}10)$$

式中 X_1、X_2、X_0——分别为系统综合等效正序、负序、零序电抗；

I_d——基准电流，A。

（2）中性点不直接接地的三相对称交流输电线路发生两相不同地点同时接地短路时，流经接地点总的零序电流按下式计算

$$I_s=\frac{3\sqrt{3}I_d}{3X_{S1\Sigma}+3X_{S2\Sigma}+X_{C1\Sigma}+X_{C2\Sigma}+X_{D1\Sigma}+X_{D2\Sigma}+X_{C0\Sigma}+X_{D0\Sigma}} \quad (6\text{-}11)$$

式中 $X_{S1\Sigma}$、$X_{C1\Sigma}$、$X_{D1\Sigma}$——分别为正序等效网络各支的综合电抗；

$X_{S2\Sigma}$、$X_{C2\Sigma}$、$X_{D2\Sigma}$——分别为负序等效网络各支的综合电抗；

$X_{C0\Sigma}$、$X_{D0\Sigma}$——分别为零序等效网络各支的综合电抗；

I_d——基准电流，A。

等效网络如图 6-5 所示，图中 C、D 为接地故障点，在中性点不直接接地系统中，$X_{S0\Sigma}$ 接近无限大。

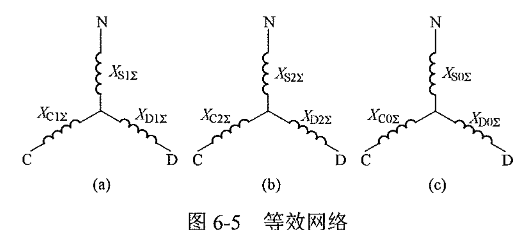


图 6-5 等效网络

（a）正序；（b）负序；（c）零序

（二）短路电流分配

当输电线路接地故障时，需要分别确定故障线路和非故障线路对电信线路的感应影响。因此，只有接地点的总电流是不行的，还必须知道有关输电线路上的故障电流。计算方法是根据电流与阻抗成反比关系，按零序网络进行反运算，以求得故障点两侧以及系统中有关输电线路导线中流通的零序电流，即称为短路电流分配。

短路电流分配计算常用公式见表 6-6。必须指出，零序电流只能在零序网络中流通，因此，短路电流分配一定要在零序网络中进行。

两相在不同地点接地短路，接地短路电流从一个接地故障相的接地点流入大地，经过大地由另一接地故障相的接地点返回另一相，入地点的总电流就是线路中和大地中的电流，故不需进行电流分配计算。

有时电信线路不但和所需计算的输电线路接近，还可能和所需计算输电线路相邻近的输电线路同时接近。尤其是在输电线路两端电厂或变电站出口处拥挤地段这种情况更为常见。为了考虑输电线路对电信线路的综合感应影响，实际工作中常常还要计算邻近有关输电线路的零序电流。

（三）短路电流曲线绘制

短路电流曲线是表征沿着所计算输电线路移动接

地短路点时，所计算输电线路和系统中有关输电线路零序电流的变化规律。由于接地点总电流是由系统中所有电源供出的，系统中所具有零序回路的输电线路都会有不同数值的零序电流流通，其值的大小必定是随着所计算输电线路的短路点的变化而变化。这就说明，完全可以把邻近有关输电线路的短路电流曲线，按所计算输电线路的比例绘在同一个坐标系内。对于任一短路点，可以在同一横坐标上，同时查出任一有关输电线路的零序电流。接地短路点的选取，以能有效地控制曲线形状为准，一般可等距地取 4 点或 5 点，两端点是在所计算输电线路两端母线上。对短路电流曲线变化陡峭的区段，可适当补充接地短路点。每一接地短路点都要按照上述步骤进行短路电流分配。

短路电流曲线的绘制是依所计算输电线路长度和短路电流值按比例绘在米格纸上。横轴为输电线路长度（km），纵轴为短路电流（A 或 kA）。图下要相应地画上所计算输电线路和有关输电线路的系统原理接线，标出短路电流方向。具体计算见本章第九节计算实例。

目前，工程设计中单相接地短路电流计算一般都使用计算机计算。即使用《送电线路通信保护设计计算制图软件包》中的单相接地短路电流计算功能模块进行计算。计算时，需输入输电线路概况（工程编号、线路电压、线路长度、计算的起点和终点）和系统阻抗（线路回路数、起点的正序及零序阻抗、终点的正序及零序阻抗、故障回路的线路正序及零序阻抗。如双回输电线路还需输入非故障回路的正序和零序阻抗。故障回路一般取 11 个短路点，各短路点之间的距离及阻抗均匀划分）。

（四）计算时短路电流的选取

短路电流计算一般是考虑电力系统运行在最大负荷和接地故障发生在最不利的地点情况下，但这种情况是极少发生的，同时，在以往短路电流的计算中都不考虑接地电阻。在此情况下把计算得出的最大短路电流值乘以 0.7（对于电信电缆线路、光缆线路及铁路半自动装置信号线路乘以 0.85）作为危险影响计算时的影响电流值。

五、直流输电线路短路电流

输电线路短路电流含有两种分量，即按指数单调衰减的非周期分量和幅值恒定的周期分量。对于三相对称交流输电线路，由于非周期分量衰减的速度较快，且比重较小，所以一般只考虑单一频率的稳态周期分量。直流输电线路短路电流则有所不同，它基本上不存在稳态周期分量，而只有暂态非周期分量，在 5～10ms 内迅速地限制和消除故障电流，所以短路电流的稳态值是很小的，频率约 20～40Hz，一般取 30Hz，是短路电流各频率分量的加权值之和。

在实际工程应用中，要简化计算确定直流输电线路短路影响电流幅值的大小、持续时间的长短、波形的频率特性以及故障点两侧的电流分配，具有一定的难度。

根据相关经验，当直流输电线路一极导线接地短路时，由于定电流调节器的作用，瞬时短路电流一般仅为额定负荷电流的 2～3 倍，±500kV 某直流输电线路实测短路电流为额定负荷电流的 2～2.2 倍。目前我国±400kV 直流输电线路的负荷电流一般为 750A 左右，±500kV 直流输电线路的负荷电流一般为 1000～2000A，±660kV 直流输电线路的负荷电流一般为 3000A 左右，±800 kV 特高压直流输电线路的负荷电流一般为 4000～6250A，±1100 kV 特高压直流输电线路的负荷电流一般为 5500A 左右。可见直流输电线路的瞬间短路电流远小于同电压等级交流输电线路的短路电流。

第三节 屏蔽系数计算

任何接地的金属回路对电磁影响都有不同程度的屏蔽作用。屏蔽作用以屏蔽系数表示，它是当有屏蔽体和没有屏蔽体时，输电线路在电信线路上感应的电压或电流之比。本节主要介绍输电线路架空地线或良导体屏蔽线、通信线路上专用屏蔽线、电信电缆金属外护层及铁道钢轨的屏蔽系数计算方法，同时给出了常用通信电缆的屏蔽系数或屏蔽系数曲线。

一、电磁屏蔽原理

影响回路中不平衡电流产生的一次磁场，在接地的金属回路中产生感应电流。此电流产生二次磁场，二次场对一次场抵消一部分，随着磁场的减弱，被影响回路的磁影响就要降低。屏蔽系数 k 是有屏蔽体时影响线路在被影响线路上感应的纵电动势 E' 与无屏蔽体时影响线路在被影响线路上感应的纵电动势 E 之比，即

$$k=\frac{E'}{E} \tag{6-12}$$

因为 $E'<E$，所以屏蔽系数是一个小于 1 的数，其数值越小表示屏蔽作用越好。如图 6-6 所示，设 $Z_{1A}=R_{1A}+j\omega M_{1A}$ 为影响线路 1 与被影响线路 A 间的互感阻抗（Ω/km）；$Z_{1S}=R_{1S}+j\omega M_{1S}$ 为影响线路 1 与屏蔽体 S 间的互感阻抗；$Z_{SA}=R_{SA}+j\omega M_{SA}$ 为屏蔽体 S 与被影

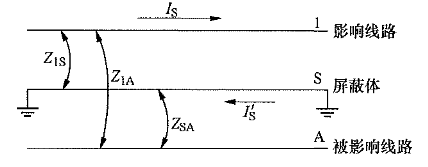


图 6-6 接地金属回路的屏蔽作用

响线路 A 间的互感阻抗；$Z_S=R_S+j\omega L_S$ 为屏蔽体 S 的全阻抗。

在平行接近、回路长度都等于 l 时，对于回路 S 和 A 可列出

$$\left.\begin{aligned} Z_S lI'_S - Z_{1S} lI_S &= 0 \\ Z_{1A} lI_S - Z_{SA} lI'_S &= E' \end{aligned}\right\} \tag{6-13}$$

式中 I_S ——影响电流，A；

I'_S ——在屏蔽体中产生的感应电流，A。

求解上面的方程组，可得到

$$E' = \frac{Z_{1A}Z_S - Z_{1S}Z_{SA}}{Z_S} I_S l \tag{6-14}$$

将 $E=Z_{1A}I_S l$ 和式（6-14）代入式（6-12），得

$$k = \frac{E'}{E} = 1 - \frac{Z_{1S}Z_{SA}}{Z_{1A}Z_S} \tag{6-15}$$

式（6-15）为屏蔽系数计算的一般表达式。可见，屏蔽系数不但与回路之间的互感抗有关，而且也取决于屏蔽体的全阻抗。当屏蔽体接地电阻为零，即为一种理想的情况，此种状态下的屏蔽系数称为理想屏蔽系数，或称固有屏蔽系数。

输电线路的地线一般为逐塔接地，当输电线路发生闪络接地时，在地线中除由相导线中零序电流感应而产生的感应电流外，还有一部分零序电流通过闪络点经铁塔返回地线后，再逐塔由接地装置入地，这个电流（称自由分量电流）同样可以使被影响线路上感应纵电动势降低。只要求出自由分量电流在接地系统中的分布，就可以确定其屏蔽效应。实际电流分布计算较为复杂，在工程中一般都是通过计算机软件求解。本节仅介绍和讨论感应分量电流的屏蔽效应计算。

在电磁感应影响防护设计中，影响线路是输电线路，被影响线路是电信线路，常遇到的屏蔽体有：架空输电线路的地线、电信线路专用屏蔽线、电信电缆的金属外护层和铁路轨道等。

二、输电线路架空地线或良导体屏蔽地线的屏蔽系数

（一）屏蔽系数计算

为防雷而在输电线路杆塔上部架设的接地地线，通常使用钢绞线，钢质地线屏蔽效果较差，为了降低输电线路对电信线路的危险影响，可将普通地线改为导电良好的有色金属线，以减少地线全阻抗，提高地线屏蔽效果。目前在实际输电线路工程建设中，为满足系统通信要求，其中一根地线一般采用架空复合地线（OPGW），其导电性能较好，相当于良导体屏蔽地线。普通地线或良导体屏蔽地线的屏蔽系数用 k 表示，考虑到 $Z_{1A}\approx Z_{SA}$，则式（6-15）可改写为

$$k = 1 - \frac{Z_{1S}}{Z_S} \tag{6-16}$$

一般全阻抗 Z_{1S} 的有效分量 R_{1S} 是很小的，可以忽略，则式（6-16）将为

$$k = 1 - \frac{j\omega M_{1S}}{Z_S} \tag{6-17}$$

1. 单根架空地线或良导体屏蔽地线的屏蔽系数

$$k_1 = 1 - \frac{j\omega M_{1s}}{\frac{2R_g}{l_b} + R_s + j\omega L_s} \tag{6-18}$$

$$M_{1s} = \left(2\ln\frac{2}{1.78\alpha a_{1s}} + 1\right)\times 10^{-4} \tag{6-19}$$

$$L_s = \left(2\ln\frac{2}{1.78\alpha r} + 1\right)\times 10^{-4} \tag{6-20}$$

$$\alpha = \sqrt{\mu_0\sigma\omega}, \omega = 2\pi f, \mu_0 = 4\pi\times 10^{-4} \tag{6-21}$$

式中 M_{1s} ——输电线路与屏蔽地线间单位长度互感系数，可通过式（6-19）计算获得，50Hz 的 ωM_{1s} 值也可利用图 6-27 互感阻抗诺模图查取，H/km；

L_s ——屏蔽地线单位长度自感系数，H/km，可通过式（6-20）计算获得，50Hz 的 ωL_s 值也可利用图 6-28 互感阻抗曲线查取；

R_s ——屏蔽地线有效电阻，Ω；

R_g ——屏蔽地线两端接地电阻，Ω；

l_b ——屏蔽地线架设长度，km；

a_{1s} ——输电线路各相导线与屏蔽地线之间的几何均距，m，$a_{1s}=\sqrt[3]{a_{xa}a_{xb}a_{xc}}$，$a_{xa}$、$a_{xb}$、$a_{xc}$ 分别为屏蔽地线 x 距 a、b、c 三相导线（对于直流输电线路则为两相导线）间的距离；

r ——屏蔽地线半径，m；

α ——计算参数，1/m，可根据式（6-21）计算获得，说明见式（6-57）。

2. 两根同型号架空地线或良导体屏蔽地线的屏蔽系数

$$k_2 = 1 - \frac{j\omega M_{1s}}{\frac{2R_g}{l_b} + \frac{R_s}{2} + \frac{j\omega(L_s + M_{ss})}{2}} \tag{6-22}$$

$$L_s = \left(2\ln\frac{2}{1.78\alpha r_e} + 1\right)\times 10^{-4} \tag{6-23}$$

$$M_{ss} = \left(2\ln\frac{2}{1.78\alpha a_{ss}} + 1\right)\times 10^{-4} \tag{6-24}$$

$$r_e = \sqrt{r a_{ss}}$$

式中 M_{ss} ——屏蔽线间互感系数，H/km，可通过式（6-24）计算获得，50Hz 的 ωM_{ss} 值也可利用图 6-28 互感阻抗曲线查取；

r_e ——屏蔽地线等效半径，m；

a_{ss} ——两根屏蔽地线之间的距离，m；

M_{1s} ——输电线路与屏蔽地线间单位长度互感系数，H，计算同式（6-19），但 a_{1s} 为输电线路各相导线与两根屏蔽地线之间的几何均距，m，$a_{1s}=\sqrt[6]{a_{xa}a_{xb}a_{xc}a_{ya}a_{yb}a_{yc}}$，$a_{xa}$、$a_{xb}$、$a_{xc}$、$a_{ya}$、$a_{yb}$、$a_{yc}$ 分别为两根屏蔽地线 x、y 距 a、b、c 三相导线（对于直流输电线路则为两极导线）间的距离；

其他符号含义同式（6-18）～式（6-21）。

一般架空地线的屏蔽系数估算值见表 6-7。

表 6-7 架空地线的屏蔽系数（f=50Hz）

序号	架空地线直流电阻（Ω/km）	单根架空地线的屏蔽系数	两根屏蔽地线的屏蔽系数
1	小于 0.1	0.55～0.7	0.4～0.5
2	小于 0.5	0.65～0.75	0.65～0.75
3	小于 1.0	0.8～0.9	0.8～0.9

注 架空地线为双根时，表中直流电阻值是两根地线的并联电阻。

（二）屏蔽地线设计的有关问题

在屏蔽地线的设计中，要考虑屏蔽地线在输电线路杆塔上的架设位置，屏蔽地线架设的长度以及屏蔽地线两端接地电阻、中间接地电阻和屏蔽地线的材料、截面等。

1. 屏蔽地线在杆塔上的布置

屏蔽地线在输电线路杆塔上架设位置，通常是架设于杆塔顶部地线支架上，代替原有的架空地线，同时起到防雷与屏蔽的作用。如果采用的杆塔不宜将屏蔽地线设置在顶部地线支架上时，应根据不同杆塔型式，不同电压等级，研究屏蔽地线的合理布置方式。

如图 6-7 为某一双回路鼓型塔，屏蔽地线 p 布置在塔身横隔空档内。由于屏蔽地线布置在塔身上，离每根导线 D 的距离均接近，可改善屏蔽效果。图 6-8 为猫头型塔、图 6-9 为酒杯型塔，仿照双回路鼓型塔，把屏蔽地线 p 布置在瓶口处。图 6-10 为上字型塔，因为三相导线呈上字型排列，上横担的一侧为空区，将屏蔽地线 p 布置在这一区内，也是一种合理的解决办法。

2. 屏蔽地线的接地电阻

根据理论分析和多次试验论证，要想提高感应分量的屏蔽效应，应尽可能地降低屏蔽地线两端接地电阻，对于中间接地电阻只要能达到防雷接地要求就可以了。屏蔽地线两端接地电阻值，是根据设计计算确定的，一般要求在 1Ω 左右，最小 0.5Ω。可考虑利用现有接地装置，新设置时要进行现场实际调查和测量，选择土壤电阻率低的地点和开阔地区敷设接地装置。一基接地装置达不到要求时，可通过敷设多基接地装置来实现。

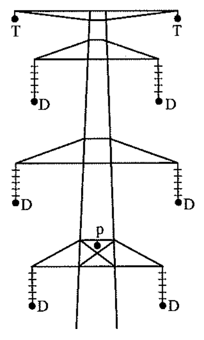


图 6-7 双回路鼓型塔屏蔽地线位置

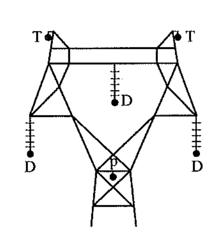


图 6-8 猫头型塔屏蔽地线位置

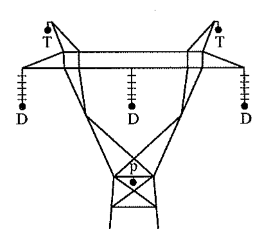


图 6-9 酒杯型塔屏蔽地线位置

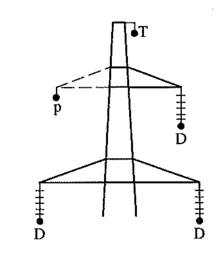


图 6-10 上字型塔屏蔽地线位置

3. 屏蔽地线长度

屏蔽地线长度由以下几点来确定：

（1）根据屏蔽系数计算来要求；

（2）要稍大于被保护区段电信线路的长度；

（3）屏蔽地线终端要在耐张塔处断引；

（4）为了实现屏蔽地线终端的接地电阻值，终端应选择在土壤电阻率较好且易于敷设接地装置的地点。

三、架空电信线路上专用屏蔽线的屏蔽系数

当在电信线路杆上架设专用屏蔽线时，考虑 $Z_{1S}\approx Z_{1A}$，则式（6-15）可改写为

$$k=1-\frac{Z_{SA}}{Z_S} \tag{6-25}$$

一般全阻抗 Z_{SA} 的有效分量 R_{SA} 是很小的，可以忽略，则式（6-25）将为

$$k=1-\frac{j\omega M_{SA}}{Z_S} \tag{6-26}$$

专用良导体屏蔽线的屏蔽系数

$$k=1-\frac{j\omega M_{SA}}{\frac{2R_g}{l_b}+R_S+j\omega L_S} \tag{6-27}$$

$$M_{SA}=\left(2\ln\frac{2}{1.78\alpha a_{SA}}+1\right)\times10^{-4} \tag{6-28}$$

式中 M_{SA}——电信线路导线与屏蔽线间单位长度互

感系数，H，可通过式（6-28）计算获得，50Hz 的 ωM_{SA} 值也可利用图 6-28 互感阻抗曲线查取；

a_{SA} ——电信线路导线与屏蔽线之间的几何均距，m，计算方法可参考式（6-18）和式（6-22）中输电线路与屏蔽地线之间几何均距的计算方法；

其他符号含义同式（6-18）～式（6-21）。

四、电信电缆金属外护层的屏蔽系数

电信电缆金属外护层有多种不同的类型，常见的有铅包、铅包钢带铠装、铝包、铝包钢带铠装等。由于外护层类型和敷设方式的不同，屏蔽系数变化范围较大。以下对电信电缆的固有屏蔽系数和实效屏蔽系数计算方法进行介绍。

（一）固有屏蔽系数的计算

电信电缆金属外护层的固有屏蔽系数用 k_0 表示，考虑到 $Z_{1S}\approx Z_{1A}$，根据式（6-15），得

$$k_0=1-\frac{Z_{rA}}{Z_r}=\frac{Z_r-Z_{rA}}{Z_r}=\frac{R_r-R_{rA}+j\omega(L_r-M_{rA})}{R_r+j\omega L_r} \tag{6-29}$$

由于电信电缆外护层—大地回路电感在数值上近似等于外护层与芯线间互感，即 $L_r\approx M_{rA}$，全阻抗的有效分量 R_{rA} 很小，而在低频时 R_r 又接近于直流电阻 R_0，即可认为 $R_r-R_{rA}\approx R_0$，则式（6-29）可改写为

$$k_0=\frac{R_0}{R_r+j\omega L_r}=\frac{R_0}{Z_r} \tag{6-30}$$

对具有铁磁物体外护层的电缆，其外护层的固有屏蔽系数为

$$\left.\begin{aligned}
k_0&=\frac{R_0}{R_r+R_i+j\omega(L_r+L_{ri})}=\frac{R_0}{Z_r}\\
R_0&=\frac{R_{al}R_A}{R_{al}+R_A}\ \text{或}\ R_0=\frac{R_LR_A}{R_L+R_A}\\
R_{al}&=1000\times\frac{\rho_{al}}{\pi(d_{al}+\delta_{al})\delta_{al}}\\
R_L&=1000\times\frac{\rho_L}{\pi(d_L+\delta_L)\delta_L}\\
R_A&=1000\times\frac{\rho_A\pi Dm_2}{m_3b^2\delta}\\
m_2&=\frac{b}{b+\Delta}\\
R_i&=1000\times\frac{\omega\mu_R'\delta m_2m_3}{\pi D}\\
L_{ri}&=1000\times\frac{\mu_L\delta m_2m_3}{\pi D}
\end{aligned}\right\} \tag{6-31}$$

式中 R_{al}——铝层的单位长度直流电阻，Ω；

R_L——铅层的单位长度直流电阻，Ω；

R_A——铠装钢带的单位长度直流电阻，Ω；

ρ_{al}——铝的电阻率，可取 $0.029\times10^{-6}\Omega\cdot m$；

ρ_L——铅的电阻率，可取 $0.221\times10^{-6}\Omega\cdot m$；

ρ_A——铠装钢带的电阻率，可取 $0.139\times10^{-6}\Omega\cdot m$；

d_{al}——铝层内直径，m；

d_L——铅层内直径，m；

δ_{al}——铝层厚度，m；

δ_L——铅层厚度，m；

D——铠装钢带平均直径，m；

b——铠装钢带宽度，m；

δ——一层铠装钢带厚度，m；

m_3——铠装钢带层数；

m_2——铠装钢带绕包系数；

Δ——铠装钢带绕包间隙，m；

R_r——外护层的有效电阻，在低频时 $R_r\approx R_0$，Ω/km；

R_i——铠装钢带中磁滞和涡流损失增加的电阻，Ω；

L_r——外护层的外电感，一般可取 2×10^{-3}H/km；

L_{ri}——铠装钢带的内电感，H；

μ_R'——铠装钢带串联电阻部分的导磁率；

μ_L——铠装钢带串联电感部分的导磁率。

实测低碳钢带 B-H、μ-H 曲线见图 6-11，图中列出 μ_R' 和 μ_L 计算值。

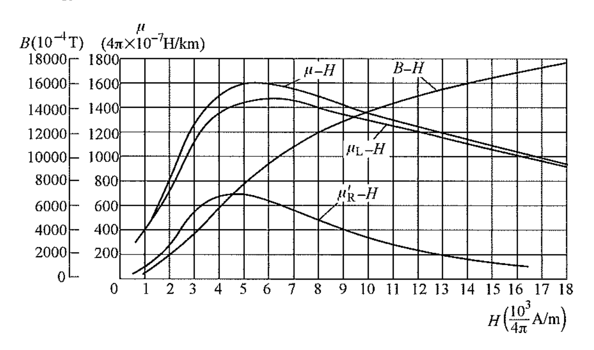


图 6-11　低碳钢 B-H、μ-H 曲线

式（6-30）和式（6-31）表明，电信电缆外护层的理想屏蔽系数等于外护层的直流电阻与外护层的全阻抗之比。

对于非铁磁物体金属外护层的固有屏蔽系数，可按式（6-30）计算，它只取决于外护层的材料性质和几何尺寸；对于铁磁物体金属外护层的理想屏蔽系数，需按式（6-31）计算，它不但取决于外护层的材料性质和尺寸，而且与外护层的感应电势大小有关。这是

因为不同的电势在外护层中引起的电流大小不同，因而具有不同磁效应的缘故。

式（6-31）中 μ_R'、μ_L 与磁场强度有关，需预先假定电流值 I，算出铠装钢带的磁场强度 H，才能由图 6-11 查取 μ_R'、μ_L 求得相应于不同电流时的 R_i、L_{ri} 值。

铠装钢带的磁场强度可按下式计算

$$\left.\begin{aligned} H &= \frac{I}{\pi(D'+\delta_e)} \\ \delta_e &= 2\delta - \frac{2\varDelta\delta}{b'} \end{aligned}\right\} \quad (6\text{-}32)$$

式中　I——外护层中电流，A；

D'——铠装钢带内直径，m；

δ_e——两层钢带的等效厚度，m，这是因为铠装层还有空气间隙，需要折合成一整块带状面积下的等效厚度；

b'、δ、$\varDelta$ 的含义见图 6-12 和式（6-31）说明。

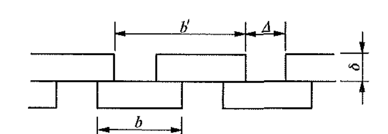


图 6-12　二层铠装钢带纵截面

【例 6-1】　某一铅包市话电缆，铅层内直径 d_L=23.2mm，铅层厚度 δ_L=1.5mm，求 f=50Hz 时该电缆的固有屏蔽系数。

解　由 $R_L = 1000\times\dfrac{\rho_L}{\pi(d_L+\delta_L)\delta_L}$

$$= 1000\times\frac{0.221\times10^{-6}}{3.14\times(23.2+1.5)\times1.5\times10^{-6}}$$

$$= 1.9\ (\Omega/\text{km})$$

铅包市话电缆，没有钢带铠装，外护层的电阻 R_r 即为铅层的直流电阻 R_L；再取 L_r=2×10⁻³H/km，由式（6-30）可得

$$k_0 = \frac{R_0}{R_r + j\omega L_r} = \frac{1.9}{1.9 + j314\times2\times10^{-3}} = 0.95$$

【例 6-2】　已知某一铝包钢带铠装 0.5/150HLP22 型市话电缆的结构参数如下：

铝层内直径	d_{al}=21mm；
铝层厚度	δ_{al}=1.5mm；
铠装钢带宽度	b=30mm；
铠装钢带厚度	δ=0.5mm；
铠装钢带绕包间隙	$\varDelta$=9mm；
铠装钢带层数	m_3=2；
铠装钢带平均直径	D=30mm。

试求 f=50Hz 时该电缆外护层的固有屏蔽系数。

解　由式（6-31）可分别求出

$$R_{al} = 1000\times\frac{\rho_{al}}{\pi(d_{al}+\delta_{al})\delta_{al}}$$

$$= 1000\times\frac{0.029\times10^{-6}}{3.14\times(21+1.5)\times1.5\times10^{-6}}$$

$$= 0.27\ (\Omega/\text{km})$$

$$m_2 = \frac{b}{b+\varDelta} = \frac{30\times10^{-3}}{(30+9)\times10^{-3}} = 0.77$$

$$R_A = 1000\times\frac{\rho_A \pi D m_2}{m_3 b^2 \delta}$$

$$= 1000\times\frac{0.139\times10^6\times3.14\times30\times10^{-3}\times0.77}{2\times(30\times10^{-3})^2\times0.5\times10^{-3}}$$

$$= 11.2\ (\Omega/\text{km})$$

$$R_0 = \frac{R_{al}R_A}{R_{al}+R_A} = \frac{0.27\times11.2}{0.27+11.2}$$

$$= 0.263\ (\Omega/\text{km})$$

$$R_i = 1000\times\frac{\omega\mu_R'\delta m_2 m_3}{\pi D}$$

$$= 1000\times\frac{\omega\mu_R'\times0.5\times10^{-3}\times0.77\times2}{3.14\times30\times10^{-3}}$$

$$= 8.16\omega\mu_R'$$

取　L_r=2×10⁻³H/km

$$L_{ri} = 1000\times\frac{\mu_L\delta m_2 m_3}{\pi D} = 8.16\mu_L$$

为了确定 μ_R'、μ_L 值，须根据式（6-32）预先选定电缆铠装钢带的磁场强度 H，计算如下：

$$D' = D - 2\delta = (3-2\times0.05)\times10^{-2}$$

$$= 2.9\times10^{-2}\text{m}$$

$$\delta_e = 2\delta - \frac{2\varDelta\delta}{b'} = 2\times0.05\times10^{-2} - \frac{2\times0.9\times0.05\times10^{-4}}{(3+0.9)\times10^{-2}}$$

$$= 0.0769\times10^{-2}\text{m}$$

如假定 I=20A，则

$$H = \frac{I}{\pi(D'+\delta_e)}$$

$$= \frac{20}{3.14\times(2.9+0.0769)\times10^{-2}}$$

$$= 2.14\times10^2\ (\text{A/m})$$

由图 6-11 查得

$$\mu_R' = 440\times4\pi\times10^{-7}\ \text{H/km}$$

$$\mu_L = 1020\times4\pi\times10^{-7}\ \text{H/km}$$

$$R_i = 8.16\omega\mu_R' = 8.16\times3.14\times440\times4\pi\times10^{-7}$$

$$= 1.415\ (\Omega/\text{km})$$

$$L_{ri}=8.16\mu_L=8.16\times1020\times4\pi\times10^{-7}$$
$$=10.45\times10^{-3}\ (\text{H/km})$$
$$k_0=\frac{R_0}{R_r+R_i+j\omega(L_r+L_{ri})}$$
$$=\frac{0.263}{0.263+1.415+j314\times(2+10.45)\times10^{-3}}$$
$$=\frac{0.263}{4.25}=0.0619$$

相应的外护层电势

$$E_s=IZ=20\times4.25=85\ (\text{V/km})$$

对电流值做一系列假定后所算得的固有屏蔽系数见表 6-8。

表 6-8　　铝包钢带铠装 0.5/150HLP22 型市话电缆固有屏蔽系数

I (A)	μ_R'	μ_L	R_i (Ω/km)	L_{ri} (mH/km)	Z_r (Ω/km)	k_0	E_s (V/km)
	($4\pi\times10^{-7}$H/km)						
5	30	330	0.0966	3.38	1.73	0.152	8.65
10	130	510	0.419	5.22	2.36	0.1115	23.6
15	265	730	0.853	7.47	3.18	0.0828	47.7
20	440	1020	1.415	10.45	4.25	0.0619	85
30	660	1380	2.125	14.12	5.59	0.0471	167.7
40	650	1470	2.095	15.05	5.85	0.0450	234
50	565	1460	1.82	14.95	5.71	0.0461	286
60	460	1400	1.48	14.32	5.42	0.0486	325
70	360	1325	1.16	13.58	5.09	0.0517	356.5
80	290	1260	0.935	12.90	4.82	0.0547	385
90	220	1200	0.708	12.30	4.60	0.0572	414
100	180	1140	0.58	11.68	4.37	0.0602	437

注　R_0=0.263Ω/km，$L_r=2\times10^{-3}$H/km。

从表 6-8 计算结果可以看出，随着外护层感应电势的增大，固有屏蔽系数逐渐减小，但增到一定数值时，电势继续增大，固有屏蔽系数反而开始增大，因为铠装钢带中磁通接近饱和时，随着磁场强度的增大，导磁率开始变小。铝包钢带铠装电信电缆的屏蔽作用是相当显著的，因为采用铝包大大降低了外护层的直流电阻，钢带铠装又增加了外护层的全阻抗，所以这类电信电缆也称高屏蔽电缆。

（二）常用电信电缆固有屏蔽系数

电信电缆固有屏蔽系数计算比较复杂，在实际工作中使用的固有屏蔽系数曲线是通过测量获得的。不同型号电信电缆 f=50Hz 和 f=800Hz 的金属护套固有屏蔽系数见图 6-13～图 6-24 和表 6-9～表 6-12。当电信电缆无固有屏蔽系数实测值时，可根据电缆型号、结构特性从上述图表中查取。

图 6-13　铅包电缆固有屏蔽系数曲线（f=50Hz）

D_1—铅皮外径

注：适用于铅皮厚度为 1.6～2.0mm

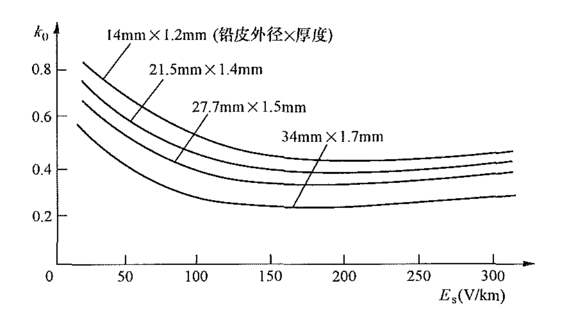


图 6-14　铅包钢带（2×0.5）铠装电缆固有屏蔽系数曲线（f=50Hz）

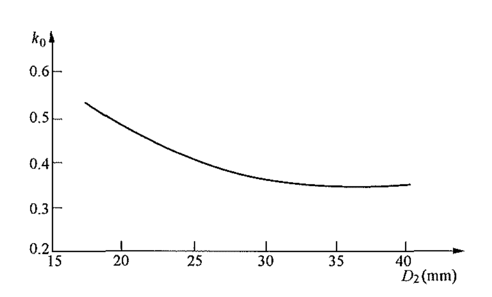


图 6-15 铝包电缆固有屏蔽系数曲线（f=50Hz）

D_2—铝皮外径

注：适用于铝包厚度为 1.8～2.0mm

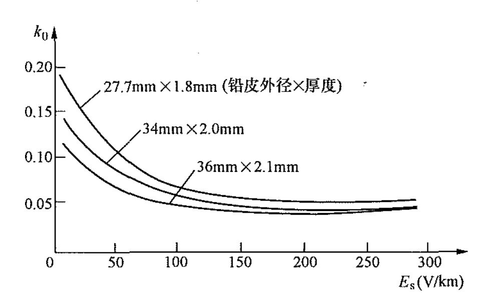


图 6-16 铅包钢带（2×0.5）铠装电缆固有屏蔽系数曲线（f=50Hz）

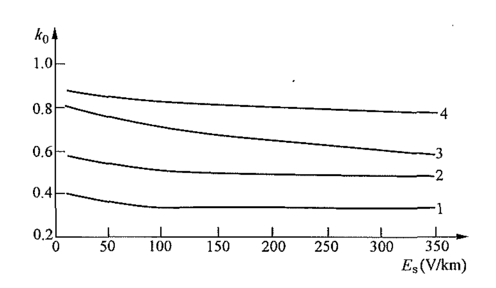


图 6-17 小同轴铅包综合钢丝铠装通信电缆固有屏蔽系数曲线（f=50Hz）

1—钢丝接铅皮，同轴对外导体接铅皮时，测内导体；

2—钢丝接铅皮，同轴对外导体与铅皮断开时，测内导体；

3—钢丝与铅皮断开，同轴对外导体接铅皮时，测内导体；

4—钢丝与铅皮断开，同轴对外导体与铅皮断开时，测内导体。

注：电缆型号 HOQZ15-4×1.2/4.4+3×4×0.9+6×1×0.6，铅护套厚度 2.3mm，钢丝铠装ϕ4mm

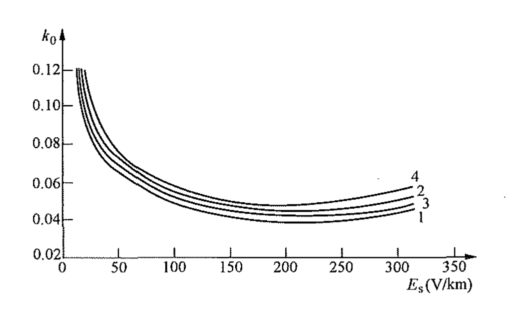


图 6-18 同轴铝包综合钢带铠装通信电缆固有屏蔽系数曲线（f=50Hz）

1—钢带接铝皮，同轴对外导体接铝皮时，测内导体；

2—钢带接铝皮，同轴对外导体与铝皮断开时，测内导体；

3—钢带与铝皮断开，同轴对外导体接铝皮时，测内导体；

4—钢带与铝皮断开，同轴对外导体与铝皮断开时，测内导体。

注：电缆型号为 HOLZ22-4×1.2/4.4+3×4×0.9+6×1×0.6，铝护套厚度 1.8mm，钢带铠装

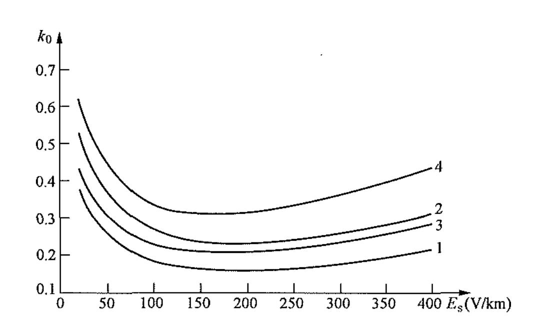


图 6-19 中同轴铅包综合钢带铠装通信电缆固有屏蔽系数曲线（f=50Hz）

1—钢带接铅皮，同轴对外导体接铅皮时，测内导体；

2—钢带接铅皮，同轴对外导体与铅皮断开时，测内导体；

3—钢带与铅皮断开，同轴对外导体接铅皮时，测内导体；

4—钢带与铅皮断开，同轴对外导体与铅皮断开时，测内导体。

注：电缆信号为 HOYDQZ12-4×2.6/9.4+4×4×0.9+1×4×0.9+6×1×0.6，铅包护套厚度 1.8mm，钢带铠装

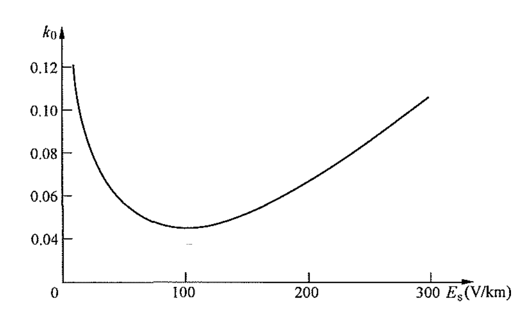


图 6-20 四管同轴综合高屏蔽电缆固有屏蔽系数曲线（f=50Hz）

注：电缆型号为 HOYDLZG22、HOL23-G1、HOL23-G2 4×2.6/9.5+4×4×0.9（高）+1×4×0.9（低）+6×1×0.6-（低），铝包厚度 1.6mm，DT4 型电工钝铁带

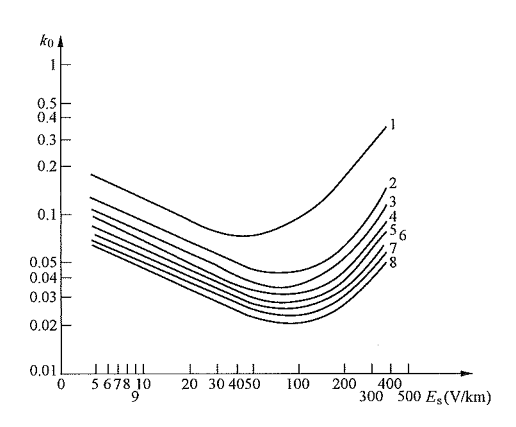


图 6-21　DT4 型钢带铠装铝护套电缆固有屏蔽系数曲线（f=50Hz）

注：图中曲线 1～8 的具体含义见表 6-9

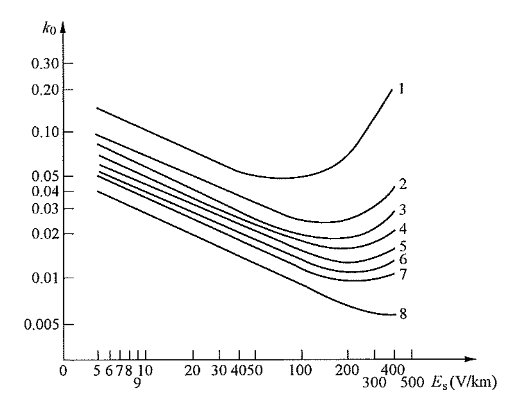


图 6-22　DT4 型钢带、钢丝铠装铝护套电缆固有屏蔽系数曲线（f=50Hz）

注：图中曲线 1～8 的具体含义见表 6-9

表 6-9　**DT4 型电缆结构参数表**　mm

图号	曲线编号		1	2	3	4	5	6	7	8
6-21	铝护套	d_1	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0
		d_2	12.4	17.4	22.2	27.0	31.8	36.6	41.4	46.2
		δ_1	1.3	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9
	钢带	D	20	25	30	35	40	45	50	55
		b	20	25	30	35	35	35	45	45
		δ	0.3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
		m_4	2	2	2	2	2	2	2	2
		$b+\Delta$	28	35	42	49	49	49	63	63
6-22	铝护套	d_1	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0
		d_2	12.4	17.4	22.2	27.0	31.8	36.6	41.4	46.2
		δ_1	1.3	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9
	钢带	D	20	25	30	35	40	45	50	55
		b	20	25	30	35	35	35	45	45
		δ	0.3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
		m_4	2	2	2	2	2	2	2	2
		$b+\Delta$	28	35	42	49	49	49	63	63
	钢丝	ϕ	4	4	4	4	4	4	4	6
		D_3	29	34	39	44	49	54	59	66
		m_5	20	24	28	31	35	38	42	30
		$b_3+\Delta$	290	340	390	440	490	540	590	660

注　d_1—铝护套外径；d_2—铝护套内径；δ_1—铝皮厚度（平均值）；D—钢带绕包平均直径；$b+\Delta$—钢带绕包节距；m_4—钢带总根数；ϕ—单根钢丝直径；D_3—钢丝绕包平均直径；m_5—钢丝总根数；$b_3+\Delta$—钢丝绕包节距。δ、b、Δ含义见图 6-12。

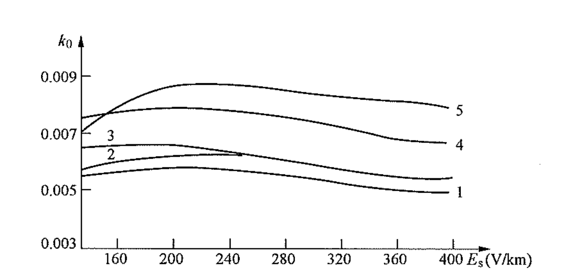


图 6-23 高屏蔽四管中同轴电缆磁屏蔽系数（f=800Hz）

1—两层 DT4 型钢带；2—两层 DT4 型镀锌钢带；3—内层 DT4 型钢带，外层镀锌钢带；4—内层镀锌钢带，外层 DT4 型钢带；5—两层镀锌钢带

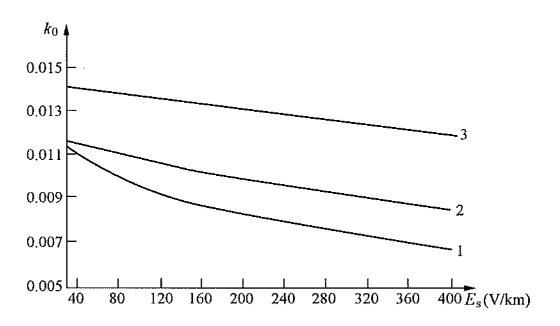


图 6-24 高屏蔽六管小同轴电缆磁屏蔽系数（f=800Hz）

1—铝厚 1.4mm，两层 DT4 型钢带；2—铝厚 2.0mm，两层镀锌钢带；3—铝厚 1.4mm，两层镀锌钢带

表 6-10 常用铅护套长途电信电缆的磁屏蔽系数（f=800Hz）

序号	电缆型号及规格		屏蔽系数
1	对称电缆	HEQ2-1×4×1.2	0.14
2		HEQ2-4×4×1.2	0.12
3		HEQ2-7×4×1.2	0.09
4	小同轴电缆	HOYQZ-4×1.2/4.4	0.15
5		HOYQZ15-4×1.2/4.4	0.075
6	中同轴电缆	HOYDQZ12-4×2.6/9.5	0.06
7		HOYDQZ12-8×2.6/9.5	0.05

表 6-11 常用铝护套长途电信电缆的磁屏蔽系数（f=800Hz）

序号	电缆型号及规格		屏蔽系数
1	对称电缆	HEL22-1×4×1.2	0.09
2		HEL22-4×4×1.2	0.014
3		HEL22-7×4×1.2	0.012
4	小同轴电缆	HOYPLWZ21-4×1.2/4.4	0.025
5		HOYPLZ22-4×1.2/4.4	0.01
6	中同轴电缆	HOYDLWZ21-4×2.6/9.5	0.015

表 6-12 常用市话电缆的磁屏蔽系数（f=800Hz）

序号	电缆型号及规格	屏蔽系数
1	HQ-300×2×0.5	0.15
2	HYA-50×2×0.5	0.4
3	HYA-100×2×0.5	0.3
4	HYA-200×2×0.5	0.27
5	HYA-400×2×0.5	0.15
6	HYA-600×2×0.4	0.19
7	HYA-800×2×0.4	0.13

（三）实效屏蔽系数计算

（1）当电信电缆金属外护层在接近段两端终接波阻抗或接近段两端以外电信电缆有较长的延长段而相当于终接波阻抗时，对于均匀接地的电信电缆实效屏蔽系数 k 可按下式计算：

$$k=k_0+(1-k_0)\times\frac{1-e^{-\gamma l_T}}{\gamma l_T} \quad (6\text{-}33)$$

$$\gamma=\sqrt{(R_s+j\omega L_s)(G_s+j\omega C_s)} \quad (6\text{-}34)$$

式中 k_0——电信电缆的固有屏蔽系数，可通过图 6-13～图 6-24 查取；

l_T——接近段内电信电缆长度，km；

γ——均匀接地电信电缆“护套—大地”回路的传播常数，1/km；

R_s、L_s、G_s、C_s——分别是均匀接地电信电缆“护套—大地”回路的一次电气参数，分别为电阻、电感、绝缘电导和电容，它们是电缆回路的基本参数，取决于电缆的结构、材料和传输信号的频率。

式（6-33）是电信电缆终端接地电阻匹配时接近段的实效屏蔽系数计算公式。对于均匀接地电信电缆只要延长段有 1km 长已能形成特性阻抗，故该公式具有广泛的实用性。

（2）接近段间隔接地电信电缆实效屏蔽系数可按下列通用算式计算。

$$k=k_0+(1-k_0)K_c\frac{K_b+K_e}{2} \quad (6\text{-}35)$$

$$K_c=\frac{1-e^{\gamma l_T}}{\gamma l_T} \quad (6\text{-}36)$$

$$K_b=\frac{2R_bZ_b}{Z_b(Z_c'+R_b)+R_bZ_c'} \quad (6\text{-}37)$$

$$K_e = \frac{2R_e Z_e}{Z_e(Z'_c + R_e) + R_e Z'_c} \quad (6\text{-}38)$$

其中
$$\gamma' = \frac{1}{d}\ln(u + \sqrt{u^2 - 1})$$
$$u = \frac{1}{\text{sh}\varepsilon_m}\text{sh}(\gamma d + \varepsilon_m)$$
$$\varepsilon_m = \frac{1}{2}\ln\frac{Z_c + 2R_m}{Z_c - 2R_m}$$
$$Z_c = \sqrt{\frac{R_s + j\omega L_s}{G_s + j\omega C_s}}$$
$$Z_b = Z'_c\text{th}(\gamma' l_1 + \varepsilon_1)$$
$$Z_e = Z'_c\text{th}(\gamma l_2 + \varepsilon_2)$$
$$Z'_c = Z_c\sqrt{\text{th}\left(\frac{\gamma d}{\alpha} + \varepsilon_m\right)\text{th}\frac{\gamma d}{\alpha}}$$
$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2}\ln\frac{Z'_c + R_{H1}}{Z'_c - R_{H1}}$$
$$\varepsilon_2 = \frac{1}{2}\ln\frac{Z'_c + R_{H2}}{Z'_c - R_{H2}}$$

式中 K_c——间隔接地电信电缆“护套—大地”回路均匀化以后，匹配条件下接近段衰减系数；

K_b、K_e——间隔接地电信电缆“护套—大地”回路均匀化以后，始、末端点的附加衰减系数；

γ'——间隔接地电信电缆“护套—大地”回路均匀化以后的传播常数，1/km；

Z_c——均匀接地电信电缆“护套—大地”回路的特性阻抗，Ω；

Z'_c——间隔接地电信电缆“护套—大地”回路均匀化以后的特性阻抗，Ω；

d——间隔接地相邻两点间的平均长度，km；

R_m——中间接地点的平均接地电阻，Ω；

ε_m——中间接地点的失配常数；

ε_1、ε_2——两端延长段末端接地电阻的失配常数；

Z_b、Z_e——间隔接地电信电缆“护套—大地”回路均匀化以后，从接近段始、末两端点分别向两侧延长段末端看去的输入阻抗，Ω；

R_b、R_e——接近段始、末端的接地电阻，Ω；

l_1、l_2——两侧延长段的长度，km；

R_{H1}、R_{H2}——两侧延长段末端的接地电阻，Ω。

接近段间隔接地电信电缆实效屏蔽系数通用计算公式是将非均匀接地电缆使之均匀化以后，按均匀接地电信电缆来计算实效屏蔽系数。其关键是要计算出均匀化以后“护套—大地”回路的传播常数γ'，特性阻抗Z'_c，从接近段始、末两端分别向延长段末端看去的输入阻抗Z_b、Z_e，以及由于中间各点、两端端点接地电阻引起的失配影响。并用K_c、K_b、K_e来表示接近段、两终端端点的衰减和附加衰减系数，以便与均匀接地电信电缆中的衰减系数等效。

（3）接近段间隔接地电信电缆实效屏蔽系数，当满足l_T≥12km（两端延长段$l_1 = l_2 = 0$）或l_T≥12km、$l_1 = l_2$≥12km时，也可按下列简化公式计算。

两侧无延长段时
$$k = \frac{R_s l_T + R_b + R_e}{(R_s + j\omega L_s)l_T + R_b + R_e} \quad (6\text{-}39)$$

两侧有延长段时
$$k = \frac{R_s l_T + Z_b + Z_e}{(R_s + j\omega L_s)l_T + Z_b + Z_e} \quad (6\text{-}40)$$
$$Z_b = \frac{R_b Z_i}{R_b + Z_i} \quad (6\text{-}41)$$
$$Z_e = \frac{R_e Z_i}{R_e + Z_i} \quad (6\text{-}42)$$
$$Z_i = \frac{Z_s d}{2}\left(1 + \sqrt{1 + \frac{4R_m}{Z_s d}}\right) \quad (6\text{-}43)$$

式中 Z_i——任一侧延长段的输入阻抗，Ω；

Z_b——始端侧延长段的简化等效阻抗，Ω；

Z_e——末端侧延长段的简化等效阻抗，Ω。

塑料绝缘护套间隔接地的电信电缆，如要形成特性阻抗，要取决于延长段内接地点的多少和接地电阻的大小，一般要$\gamma l_1 = \gamma l_2$≥3.0（末端开路）时才能认为形成了特性阻抗。故经核实比较后，在满足工程要求时，当仅接近段长度l_T≥12km（$l_1 = l_2 = 0$）或l_T≥12km、且延长段$l_1 = l_2$≥12km时，可采用以上简化计算公式。

常见通信电缆常用数据见表6-13～表6-15。

表6-13 铜线对绞纸绝缘市内电话电缆

电缆型号	规格（线对数×芯线数×芯线外径）	外径（mm）	铠装钢带		铅或铝层厚度（mm）	内径（mm）	试验电压
			层数	厚度（mm）			
HQ22（铅包）	30×2×0.5 30×2×0.6 30×2×0.7 30×2×0.9	22.3 24.5 26.4 31.8	2 2 2 2	0.5 0.5 0.5 0.5	1.25 1.25 1.4 1.4	11.2 12.9 16.4 16.8	芯线对芯线和芯线对地能经受交流50Hz电压500V，试验2min；直流电压700V，试验2min

续表

电缆型号	规 格（线对数×芯线数×芯线外径）	外径（mm）	铠装钢带		铅或铝层厚度（mm）	内径（mm）	试验电压
			层数	厚度（mm）			
HQ22（铅包）	50×2×0.5	25.3	2	0.5	1.25	14.2	芯线对芯线和芯线对地能经受交流50Hz 电压 500V，试验 2min；直流电压700V，试验 2min
	50×2×0.6	28.7	2	0.5	1.25	16.4	
	50×2×0.7	31.6	2	0.5	1.4	20.8	
	50×2×0.9	37.6	2	0.5	1.4	21.2	
	80×2×0.5	29.1	2	0.5	1.4	17.7	
	80×2×0.6	32.1	2	0.5	1.4	20.4	
	80×2×0.7	36.0	2	0.5	1.5	25.7	
	80×2×0.9	44.4	2	0.5	1.6	26.5	
	100×2×0.5	32.1	2	0.5	1.4	19.7	
	100×2×0.6	36.0	2	0.5	1.4	22.7	
	100×2×0.7	39.7	2	0.5	1.6	28.5	
	100×2×0.9	48.6	2	0.5	1.6	30.0	
	150×2×0.5	36.7	2	0.5	1.5	23.7	
	150×2×0.6	41.2	2	0.5	1.6	27.8	
	150×2×0.7	48.4	2	0.5	1.6	28.5	
	150×2×0.9	57.4	2	0.5	1.95	36.4	
	200×2×0.5	40.6	2	0.5	2.05	27.2	
	200×2×0.6	45.7	2	0.5	1.7	32.1	
	200×2×0.7	54.0	2	0.5	1.95	40.0	
	200×2×0.9	65.8	2	0.5	2.05	41.6	

表 6-14　　铜芯纸绝缘星绞低频通信电缆

电缆型号	规 格（线对数×芯线数×芯线外径）	外径（mm）	铠装钢带		铅或铝层厚度（mm）	内径（mm）	试验电压
			层数	厚度（mm）			
HEQ22（铅包）	4×4×0.8	20.2	2	0.3	1.4	9.2	能经受交流 50Hz 电压 1800V，试验 2min
	4×4×0.9	22.4	2	0.3	1.4	11.4	
	4×4×1.0	22.9	2	0.3	1.4	11.9	
	4×4×1.2	24.0	2	0.3	1.4	13.0	
	7×4×0.8	23.3	2	0.3	1.4	12.3	
	7×4×0.9	23.6	2	0.3	1.4	12.6	
	7×4×1.0	25.9	2	0.3	1.5	14.7	
	7×4×1.2	27.3	2	0.3	1.5	16.1	
	12×4×0.8	28.1	2	0.3	1.5	16.9	
	12×4×0.9	30.5	2	0.3	1.5	19.3	
	12×4×1.0	31.4	2	0.3	1.6	20.0	
	12×4×1.2	35.3	2	0.3	1.7	23.7	
	14×4×0.8	29.1	2	0.3	1.5	17.9	
	14×4×0.9	33.6	—	—	1.6	22.2	
	14×4×1.0	34.5	—	—	1.7	22.9	
	14×4×1.2	36.8	—	—	1.7	25.2	

表 6-15　　铜芯纸绳绝缘高频长途通信电缆

电缆型号	规 格（线对数×芯线数×芯线外径）	外径（mm）	铠装钢带		铅或铝层厚度（mm）	内径（mm）	试验电压
			层数	厚度（mm）			
HEQ22（铅包）	4×4×1.2+5×1×0.9	32.2	2	0.3	1.6	20.9	除信号线芯外，全部连接的线芯与铅（铝）层间能经受交流 50Hz 电压 1800V，相互连接的信号线和铅（铝）层间为 700V，试验 2min
	7×4×1.2+6×1×0.9	37.7	2	0.5	1.7	25.3	
HEL22（铝包）	4×4×1.2+5×1×0.9	30.2	2	0.3	1.3	19.4	
	7×4×1.2+6×1×0.9	34.6	2	0.3	1.4	23.6	

五、铁道钢轨的屏蔽系数

铁道钢轨是经过垫石的漏泄电阻而形成分布接地，每根钢轨之间在非电气化铁道用鱼尾板连接，在电气化铁道另有金属导线保持电气上的连接，目前高速铁路的钢轨采用无缝焊接方式连接。铁路电信线路通常在铁路中心两侧 20～50m 的范围内架设（或敷设），所以在近似计算中可认为 $Z_{1S}\approx Z_{1A}$，铁道轨道的屏蔽系数用符号 k 表示，则式（6-15）可改写为

$$k=1-\frac{Z_{rA}}{Z_r} \tag{6-44}$$

当忽略全互阻抗的有效分量 R_{rA} 时，考虑铁道轨道敷设情况的实际屏蔽系数为

$$k=1-\frac{j\omega M_{rA}}{Z'_r}$$
$$M_{rA}=\left(2\ln\frac{2}{1.78\alpha a_{cp}}+1\right)\times10^{-4} \tag{6-45}$$

式中 M_{rA}——铁道轨道与电信线路间的互感系数，H，50Hz 的 ωM_{rA} 值可利用图 6-27 互感阻抗诺模图查取；

Z'_r——铁道轨道与大地回路阻抗，Ω/km；

a_{cp}——铁道轨道与电信线路间的平均接近距离，m。

1. 单线铁道

$$Z'_r=\frac{R_F+R_{cm}+R_i}{2}+j\omega\frac{L_r+L_{ri}+M_{1-2}}{2} \tag{6-46}$$

$$R_F=1000\frac{\rho_r}{s_r}$$

$$R_{cm}=0.2R_F$$

$$R_i=\frac{10}{p}\sqrt{20\pi\omega\rho_r\mu}$$

$$L_r=\left(2\ln\frac{2}{1.78\alpha r_r}+1\right)\times10^{-4}$$

$$L_{ri}=\frac{10}{p}\sqrt{\frac{20\pi\rho_r\mu}{\omega}}$$

$$M_{1-2}=\left(2\ln\frac{2}{1.78\alpha s_{1-2}}+1\right)\times10^{-4} \tag{6-47}$$

式中 R_F——钢轨的单位长度直流电阻，Ω/km；

ρ_r——钢轨的电阻率，可取 0.19×10^{-6}，Ω·m；

s_r——钢轨的截面积，mm^2；

R_{cm}——钢轨的接缝电阻，连接良好时取 $0.2R_0$，Ω/km，对于采用无缝焊接的高速铁路钢轨，此电阻可不考虑；

R_i——由于集肤效应钢轨单位长度增加的电阻，Ω/km；

p——钢轨截面周长，cm；

μ——钢轨起始相对导磁率，一般可取 150；

L_r——钢轨的外电感，H/km；

r_r——钢轨的等周长圆半径，m；

L_{ri}——钢轨的内电感，H/km；

M_{1-2}——两根钢轨间的互感系数，H，可通过式（6-47）计算求得，50Hz 的 ωM_{1-2} 值也可利用图 6-28 互感阻抗曲线查取；

s_{1-2}——两根钢轨间距离，m；

α——计算参数，1/m，可根据式（6-21）计算获得。

P、r_r、s_{1-2} 可选用表 6-16 中所列数值。

表 6-16　钢　轨　数　据

钢轨类型	P（cm）	r_r（cm）	s_{1-2}（cm）
P_{65}	70	11.1	160
P_{50}	62	9.9	159.4
P_{43}	56	8.9	159.4

2. 双线铁道

$$Z'_r=\frac{R_F+R_{cm}+R_i}{4}+j\omega\frac{L_r+L_{ri}+M_{1-2}+M_{I-II}}{4} \tag{6-48}$$

$$M_{I-II}=\left(2\ln\frac{2}{1.78\alpha s_{I-II}}+1\right)\times10^{-4} \tag{6-49}$$

式中 M_{I-II}——两股轨道间的互感系数，H/km，可通过式（6-49）计算求得，50Hz 的 ωM_{I-II} 值也可利用图 6-27 互感阻抗诺模图查取；

s_{I-II}——两股轨道间的距离，m；

其他符号含义同式（6-46）和式（6-47）。

非电气化铁道由于轨道之间的接缝电阻较大，屏蔽作用不显著，在感应计算中可以不考虑。

土壤电阻率在 10～1000Ω·m 时，铁道轨道的屏蔽系数参见表 6-17。

表 6-17　铁道轨道屏蔽系数

铁道类别	铁道路基到输电线路或电信线路的距离	
	小于 50m	50～100m
非电气化单线铁道	0.9	1.0
非电气化双线铁道	0.8	0.9
电气化单线铁道	0.61	0.8
电气化双线铁道	0.46	0.7

3. 铁道轨道 800Hz 的屏蔽系数

根据设计经验，在无实测资料时，铁道轨道 800Hz 的实效屏蔽系数可按如下选取：单线铁道取 0.45，双线铁道取 0.35。

六、综合屏蔽系数

当输电线路和电信线路两侧都有接地屏蔽体时，综合屏蔽系数为两侧屏蔽系数的乘积；当在同一侧有多条屏蔽体存在且各屏蔽体间无电气连通时，应考虑屏蔽体间的相互影响，其综合屏蔽系数 k_n 可按以下近似式计算

$$k_n=\frac{1}{\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{k_i}-(n-1)} \tag{6-50}$$

式中 k_i——单根屏蔽体时的屏蔽系数；

n——屏蔽体根数。

第四节 危险影响计算

中性点直接接地系统的三相对称交流输电线路发生单相接地短路时，中性点不直接接地系统的三相对称交流输电线路两相在不同地点同时接地短路时，以及直流输电线路单极运行方式下极导线接地短路或双极运行方式下一极导线接地短路故障时，输电线路中的不平衡电流急剧增加。由不平衡电流对电信线产生的磁影响（感性耦合影响），通常是以电信线路上感应的纵电动势和对地电压来衡量。实际做法是首先计算纵电动势，当纵电动势超过允许标准时，再通过对地电压计算来确定电信线路是否存在危险影响。另外某些电信线路由于技术或运行上的要求，电信回路一点（或多点）接地或经设备元件（如放电器、避雷器等）接地，对于这样的电信线路要进行对地电压计算。

中性点不直接接地系统的三相对称交流输电线路发生单相接地故障时，输电线路对地不平衡电压对电信线路产生的电影响（容性耦合影响）是以通过人体的静电感应电流来衡量。对于有金属外皮接地的电缆电信线路，可不考虑容性耦合影响。直流输电线路可不考虑对电信线路的容性耦合影响。

入地电流产生的地电位升（阻性耦合影响）是以地电位差来衡量。

本节提出了输电线路对架空明线和电信电缆、光缆线路的危险影响允许值、互感系数、磁感应纵电动势、磁感应对地电压、直流输电线路导线电感量、电感应人体电流和地电位升的简化计算公式和有关曲线、图表等。

一、危险影响允许值

(一) 交流输电线路对电信线路危险影响允许值

根据 DL/T 5033—2006《输电线路对电信线路危险和干扰影响防护设计规程》第 4.1 节规定，交流输电线路对电信线路的危险影响允许值如下：

（1）中性点不直接接地系统的交流输电线路一相接地短路，而人体碰触邻近电信导线时，由容性耦合引起的流经人体的电流允许值为 15mA。

（2）在交流输电线路故障状态下，电信明线上磁感应电压应符合下列规定：

1）基本电压允许值。高可靠交流输电线路为 650V，其他交流输电线路为 430V。

2）考虑交流输电线路故障持续时间的人身安全允许值见表 6-18。

表 6-18 人身安全允许值

故障持续时间 t（s）	允许电压（V）
$0.35<t\leq0.5$	650
$0.2<t\leq0.35$	1000
$0.1<t\leq0.2$	1500
$t\leq0.1$	2000

（3）在交流输电线路故障状态下，电信电缆芯线上的感应电压应符合下列规定：

1）电信电缆芯线两端有绝缘变压器，或一端为绝缘变压器而另一端通过低阻抗接地或与带有接地的金属护套或屏蔽层连接，或所有电缆芯线在两端都装有避雷器（或放电器）时，电信电缆芯线上感应电压允许值见表 6-19。

表 6-19 电信电缆芯线上的感应电压允许值

电信电缆远距离供电方式	允许电压（V）
无远距离供电	$0.6U_{Dt1}$ 或 $0.85U_{At1}$
“导线—大地”制远距离供电	$0.6U_{Dt1}-\frac{U_{rs}}{\sqrt{2}}$ 或 $0.85U_{At1}-\frac{U_{rs}}{\sqrt{2}}$
“导线—导线”制远距离供电	$0.6U_{Dt1}-\frac{U_{rs}}{2\sqrt{2}}$ 或 $0.85U_{At1}-\frac{U_{rs}}{2\sqrt{2}}$

注 U_{Dt1}—电缆芯线与接地护套间的直流试验电压，V；
U_{At1}—电缆芯线与接地护套间的交流试验电压，V；
U_{rs}—影响计算区段远供电压，V。

2）当电信电缆芯线不符合 1）的情况时，电信电缆芯线上的感应电压允许值按电信明线规定考虑。

以上危险影响允许值除表 6-18 人身安全允许值外，其他允许值在 GB 6830—1986《电信线路遭受强电线路危险影响的允许值》中也有相同的规定。

电缆试验电压值是避免电缆介质绝缘强度击穿的保证值，已具有足够的安全系数。介质耐压强度与电

压作用的时间成正比。目前电缆试验电压采用 3s 和 1min 的试验值。而输电线路接地短路故障切除时间极短，一般在 0.1～0.5s 范围内，此时击穿电压还将进一步提高。为此电缆试验电压可采用电缆出厂时的 3s 直流或交流试验电压。如缺少 3s 试验电压值，也可采用 1min 或 2min 的试验电压值，也可采用实测值。

根据 YD/T 322—2013《铜芯聚烯烃绝缘铝塑综合护套室市通信电缆》第 4.12.1 条规定，导线与屏蔽间直流电气强度为 6kV（3s）或 3kV（1min），GB/T 13849.1—2013《聚烯烃绝缘烃护套市内通信电缆 第 1 部分：总则》第 17.1 节中也有相同的规定。

（4）考虑交流输电线路故障持续时间的设备安全电压允许值见表 6-20。

表 6-20 设备安全电压允许值

故障持续时间 t（s）	允许电压（V）
$0.35<t\leqslant 0.5$	650
$0.2<t\leqslant 0.35$	780
$\leqslant 0.2$	1030

（5）在交流输电线路故障状态下，对于有金属线对的金属光缆，应考虑金属线对上的感应电压；对于无金属线对的金属光缆，应考虑金属构件上的感应电压；对于非金属光缆，可不考虑危险影响。光缆金属线对或金属构件上的感应电压影响允许值见表 6-21。

表 6-21 光缆金属线对或金属构件上的感应电压允许值

光缆型式		允许电压（V）
有金属线对	无远距离供电	$0.6U_{\mathrm{Dt2}}$ 或 $0.85U_{\mathrm{At2}}$
	有“导线—大地”制远距离供电	$0.6U_{\mathrm{Dt2}}-\frac{U_{\mathrm{rs}}}{\sqrt{2}}$ 或 $0.85U_{\mathrm{At2}}-\frac{U_{\mathrm{rs}}}{\sqrt{2}}$
	有“导线—导线”制远距离供电	$0.6U_{\mathrm{Dt2}}-\frac{U_{\mathrm{rs}}}{2\sqrt{2}}$ 或 $0.85U_{\mathrm{At2}}-\frac{U_{\mathrm{rs}}}{2\sqrt{2}}$
无金属线对	有金属构件	$0.6U_{\mathrm{Dt3}}$

注 U_{Dt2}—光缆金属线对与接地护套间的直流试验电压，V；
U_{At2}—光缆金属线对与接地护套间的交流试验电压，V；
U_{Dt3}—光缆绝缘外护套的直流试验电压，V；
U_{rs}—影响计算区段远供电压，V。

光缆金属线对与接地护套间及金属构件与接地护套间的试验电压可根据光缆具体型号收资获得，如无确切资料时可参考以下规定。根据 YD/T 2159—2010《接入网用光电混合缆》4.3.5.4 规定，在绝缘芯线之间和芯线与地之间施加 2kV 交流电压至少 5min 应不击穿。光缆 PE 层的厚度一般等于或大于 2mm，其工频绝缘强度按通信行业标准 YD 5012— 2003《光缆线路对地绝缘指标及测试方法》附录 A.0.2 规定，单盘光缆外护层内铠装与大地间耐电压强度应不小于直流 15kV（2min），外护层内铠装与金属加强芯间耐电压强度应不小于直流 20kV（5s）；光缆接头盒内金属构件之间、金属构件与大地之间耐电压性能不应小于直流 15kV（2min）。

（二）直流输电线路对电信线路危险影响允许值

根据 DL/T 5340—2015《直流架空输电线路对电信线路危险和干扰影响防护设计技术规程》第 4.1 节规定，直流输电线路对电信线路危险影响允许值如下：

（1）在直流输电线路极导线发生接地短路故障状态下，架空明线电信线路上感应产生的纵电动势或对地电压不应超过 3000V（峰值）。

（2）在直流输电线路极导线发生接地短路故障状态下，电信电缆线路芯线上感应产生的纵电动势或对地电压允许值应符合下列规定。

1）电信电缆线路芯线两端接有隔离变压器或防雷保安器时，电信电缆芯线上的感应电压允许值见表 6-22。

表 6-22 电信电缆芯线上的感应电压允许值

电信电缆远距离供电方式	允许电压（峰值，V）
无远距离供电	$0.85U_{\mathrm{Dt1}}$ 或 $1.2U_{\mathrm{At1}}$
“导线—大地”制远距离供电	$0.85U_{\mathrm{Dt1}}-U_{\mathrm{rs}}$ 或 $1.2U_{\mathrm{At1}}-U_{\mathrm{rs}}$
“导线—导线”制远距离供电	$0.85U_{\mathrm{Dt1}}-\frac{U_{\mathrm{rs}}}{2}$ 或 $1.2U_{\mathrm{At1}}-\frac{U_{\mathrm{rs}}}{2}$

注 U_{At1}—电缆芯线与接地护套间的交流试验电压（有效值），V。
其他符号含义同表 6-19。

2）当电信电缆芯线不符合 1）规定的条件时，电信电缆芯线上的感应对地电压允许值不应超过 3000V（峰值）。

（3）在直流输电线路极导线发生接地短路故障状态下，电信电缆线路两端设备的安全电压不应超过 1456V（峰值）。

（4）在直流输电线路极导线发生接地短路故障状态下，金属光缆金属线对或金属构件上的感应电压影响允许值见表 6-23，非金属光缆可不考虑危险影响。

（三）相关说明

（1）当输电线路发生接地短路故障时，因地电流影响对邻近地埋电缆芯线，或地埋光缆金属线对、金

属构件与大地间引起的电位差、电信局（站）接地装置上的地电位升，以及同时产生感性耦合和阻性耦合两种影响合成后的数值均应符合表 6-19、表 6-21～表 6-23 规定。

表 6-23 光缆金属线对或金属构件上的感应电压允许值

光缆型式		允许电压（峰值，V）
有金属线对	无远距离供电	$0.85U_{\text{Dt2}}$ 或 $1.2U_{\text{At2}}$
	有“导线—大地”制远距离供电	$0.85U_{\text{Dt2}}-U_{\text{rs}}$ 或 $1.2U_{\text{At2}}-U_{\text{rs}}$
	有“导线—导线”制远距离供电	$0.85U_{\text{Dt2}}-\frac{U_{\text{rs}}}{2}$ 或 $1.2U_{\text{At2}}-\frac{U_{\text{rs}}}{2}$
无金属线对	有金属构件	$0.85U_{\text{Dt3}}$

注 U_{At2}—光缆金属线对与接地护套间的交流试验电压（有效值），V。
其他符号含义同表 6-21。

（2）在输电线路发生接地短路故障状态下，对于市话通信系统，应同时考虑电信维护工作人员的人身安全、电信电缆线路及两端设备的绝缘电气强度、保安单元的过流能力。

（3）在输电线路故障状态下，非电气化铁道的半自动、自动闭塞方向电路及遥控、遥信线路的感应电压（包含感应纵电动势和感应对地电压）允许值应符合以上相应类型电信线路的规定。

（4）当电信回路感应纵电动势超过允许值时，必须按电信回路工作状态进一步计算电信线路的导线与大地间产生的感应对地电压，只有感应对地电压超过以上允许值时，电信线路才存在危险影响。

二、磁危险影响

输电线路对电信线路的感性耦合危险影响，在中性点直接接地系统的三相对称交流输电线路中，应按输电线路发生一相接地短路故障计算；在双极运行的直流输电线路中，应按一极导线发生接地短路故障计算；在单极运行的直流输电线路中，应按极导线接地短路故障计算。在中性点不直接接地系统三相对称交流输电线路中，对于长途电缆线路应按输电线路两相在不同地点发生接地短路故障计算，对其他电信线路不考虑此项影响。

直流输电线路发生接地短路故障，应考虑来自换流站侧故障电流对电信线路的磁危险影响；验算电信线路对地电压时，应同时考虑来自逆变站侧故障电流对电信线路的磁危险影响。

当多条输电线路与电信线路接近时，除考虑输电线路故障电流的影响外，宜同时考虑邻近的非故障输电线路分布电流的影响。

（一）互感系数

互感系数是计算输电线路对电信线路感应纵电动势和对地电压的重要参数。由于输电线路单相接地短路电流是以大地作为回路的，而电流在地中的分布与电流的频率和所在地区大地电导率数值有关。计算输电线路与电信线路间的互感系数的方法较多，此处仅介绍 DL/T 5033—2006《输电线路对电信线路危险和干扰影响防护设计规程》附录 A 和附录 B 中采用的多项式法和诺模图法，并在两无限长大地回路互感系数计算基础上，提出有限长两线路间互感系数的修正计算。

1. 无限长线路间的互感系数

（1）平行接近的互感系数多项式计算。

两无限长平行接近线路间互感系数可按式（6-51）～式（6-56）计算

当 $X\leqslant 6$ 时

$$\text{Re}M_0(X)=123.36-1.69X+23.937X^2-4.9614X^3+0.44212X^4-0.01526X^5+0.001215\text{e}^X-200\ln X \tag{6-51}$$

$$\text{Im}M_0(X)=-339+193.67X-49.77X^2+6.979X^3-0.5243X^4+0.01672X^5+180.42\text{e}^{-X}-0.00146\text{e}^X-0.274\ln X \tag{6-52}$$

$$|M_0(X)|=142.5+45.96X-1.413X^2-198.4\ln X \tag{6-53}$$

当 $X>6$ 时

$$\text{Re}M_0(X)=-23.21\text{e}^{-0.7X} \tag{6-54}$$

$$\text{Im}M_0(X)=-400X^{-2} \tag{6-55}$$

$$|M_0(X)|=400X^{-2} \tag{6-56}$$

$$X=\alpha a,\quad \alpha=\sqrt{\mu_0\sigma\omega} \tag{6-57}$$

式中 $\text{Re}M_0(X)$——复数实部，μH/km；
$\text{Im}M_0(X)$——复数虚部，μH/km；
$|M_0(X)|$——互感系数模值，μH/km；
X——计算参数（无量纲）；
a——输电线路与电信线路的平行接近距离或等值接近距离，m；
σ——大地电导率，S/m，计算交流输电线路对电信线路感性耦合危险影响和线—电报回路干扰电流时为 50Hz 的大地电导率，计算直流输电线路对电信线路感性耦合危险影响时为 30Hz 的大地电导率，计算电话回路干扰影响噪声计电动势时为 800Hz 的大地电导率；
α——计算参数，1/m；
μ_0——真空磁导率，H/m，$\mu_0=4\pi\times10^{-7}$；

ω——影响电流角频率，rad/s，$\omega=2\pi f$；

f——影响电流的频率，Hz，计算交流输电线路对电信线路感性耦合危险影响和线—电报回路干扰电流时取 50Hz，计算直流输电线路对电信线路感性耦合危险影响时取 30Hz，计算电话回路干扰影响噪声计电动势时取 800Hz。

（2）斜接近或交叉的互感系数多项式计算。

两无限长线路斜接近及交叉时，如图 6-25 所示，互感系数可按式（6-58）或式（6-63）计算

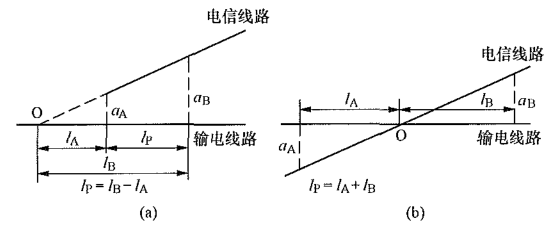


图 6-25　输电线路与电信线路斜接近或交叉相对位置图
（a）斜接近相对位置图；（b）交叉接近相对位置图

当按复数计算 $M_0(X)$时

$$[M_0(X)]_{X_A}^{X_B}=\frac{T(X_B)\mp T(X_A)}{X_B\mp X_A} \tag{6-58}$$

式中：$T(X)=\int_0^X M_0(X)\mathrm{d}x$，$X_A=\alpha a_A$，$X_B=\alpha a_B$，$\alpha=\sqrt{\mu_0\sigma\omega}$。

当电信线路在输电线路一侧斜接近时，使用“−”号；当电信线路与输电线路交叉时，使用“＋”号，分别用 $T(X)$的实部和虚部按式（6-58）计算 $M_0(X)$的实部和虚部。

当电信线路在输电线路一侧且斜接近的角度很小，即 $\alpha a_A\approx\alpha a_B$ 时，式（6-58）的数值不定，此时可按 $\alpha a=\frac{\alpha a_A+\alpha a_B}{2}$，并按平行接近计算互感系数。

$T(X)$的多项式计算公式：

当 $X\leqslant 6$ 时

$$\mathrm{Re}T(X)=323.36X-0.845X^2+7.979X^3-1.2404X^4+0.0884X^5-0.00254X^6+0.001215\mathrm{e}^X-200X\ln X \tag{6-59}$$

$$\mathrm{Im}T(X)=180.42-338.73X+96.84X^2-16.59X^3+1.745X^4-0.105X^5+0.00279X^6-180.42\mathrm{e}^{-X}-0.00146\mathrm{e}^X-0.274X\ln X \tag{6-60}$$

当 $X>6$ 时

$$\mathrm{Re}T(X)=444.218+33.157\mathrm{e}^{-0.7X} \tag{6-61}$$

$$\mathrm{Im}T(X)=-444.29+400X^{-1} \tag{6-62}$$

式中　$\mathrm{Re}T(X)$——复数实部，μH/km；

$\mathrm{Im}T(X)$——复数虚部，μH/km；

X——计算参数（无量纲），同式（6-57）。

当按模值计算 $M_0(X)$时

$$\left[|M_0(X)|\right]_{X_A}^{X_B}=\frac{S(X_B)\mp S(X_A)}{X_B\mp X_A} \tag{6-63}$$

$$S(X)=\int_0^X|M_0(X)|\mathrm{d}x \tag{6-64}$$

式中正、负符号等的使用同式（6-58）。

$S(X)$的多项式计算公式：

当 $X\leqslant 6$ 时

$$S(X)=340.9X+22.98X^2-0.471X^3-198.4X\ln X \tag{6-65}$$

当 $X>6$ 时

$$S(X)=701.69-400X^{-1} \tag{6-66}$$

式（6-51）～式（6-56）中，当 X 较大时，互感系数实部远小于虚部，此时互感系数主要取决于虚部分量（电感分量）。因此，即使实部分量的相对误差较大，对感性耦合计算的影响也不大。当 $X>10$ 时互感系数实部可简化取零值。

（3）查诺模图确定互感系数或互感阻抗。

一般情况互感系数可利用查诺模图的方法确定。图 6-26 和图 6-29 分别为频率等于 30Hz 和 800Hz 时的互感系数诺模图，图中左边为接近距离列线，右侧为大地电导率列线，中间分别给出了平行段和交叉段互感系数列线，可通过接近距离与大地电导率连线与互感列线交叉来读取互感系数。图 6-27 为频率等于 50Hz

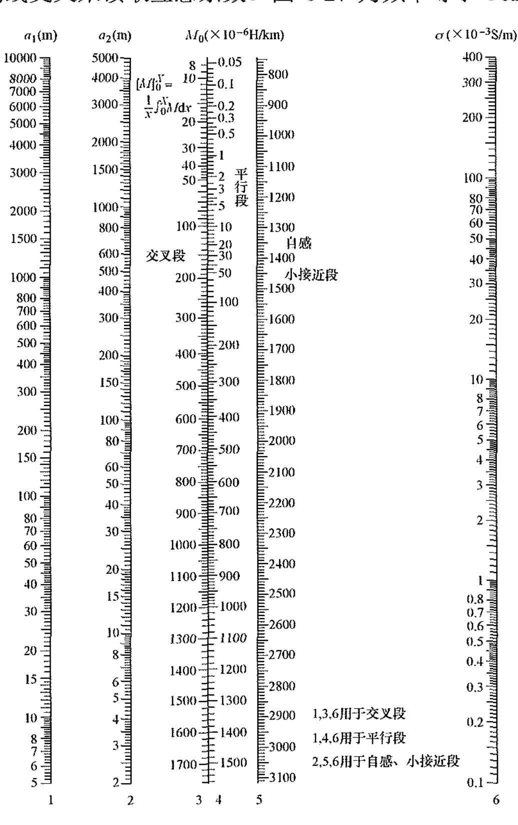


图 6-26　$f=30$Hz 互感系数诺模图

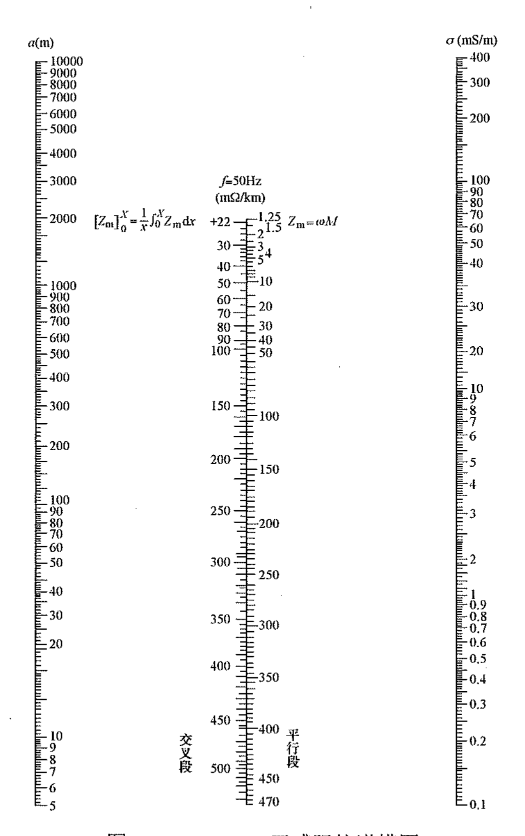


图 6-27 f=50Hz 互感阻抗诺模图

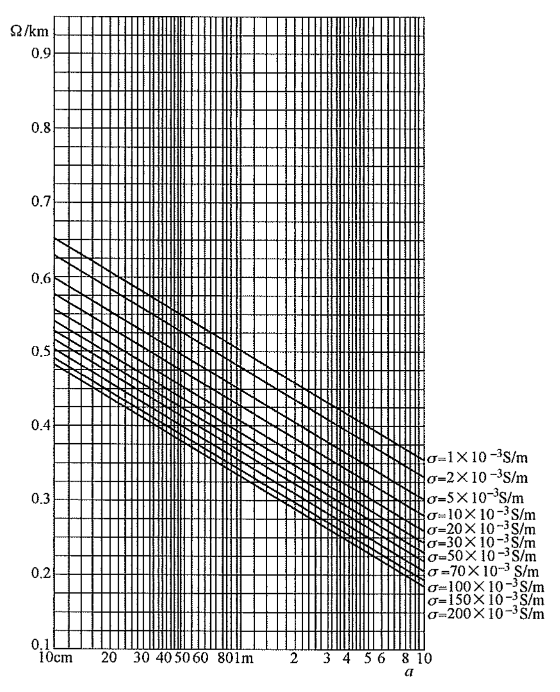


图 6-28 f=50Hz 互感阻抗曲线

$$\omega M=\omega\left(2\ln\frac{2}{1.78\alpha a}+1\right)\times10^{-4}\text{，}\ \Omega/\text{km}$$

注：1. 间距 a 的范围为 0.1～10m；

2. 主要用途为互感自感计算用。

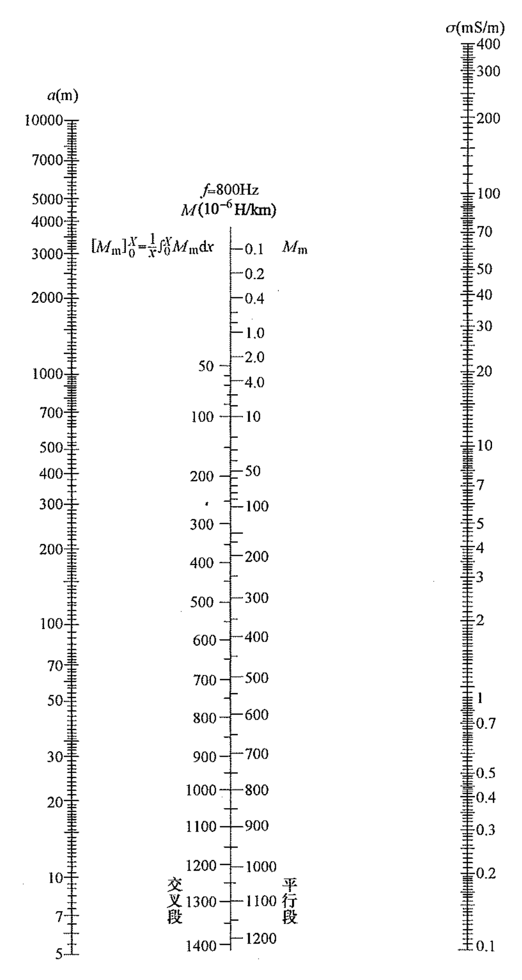


图 6-29 f=800Hz 互感系数诺模图

时的互感阻抗诺模图，图中分别给出了平行段和交叉段互感阻抗列线，可用上述方法直接查取互感阻抗值。对于斜接近段，当 $\frac{a_A}{a_B}$ 的比值在 $\frac{1}{3}$ 与 3 之间时，可采用等值接近距离 a，再利用平行段阻抗列线计算。图 6-28 为频率等于 50Hz 时的互感阻抗曲线，主要用于接近距离较小时的互感阻抗查取，也可用于自感阻抗的查取。

2. 有限长线路间的互感系数

如图 6-30 所示，两有限长平行接近线路间互感系数的计算式如下：

$$M_{AB、CD}=M(\alpha a)+\frac{1}{\alpha l_p}[F(\alpha l_{AD},\alpha a)+F(\alpha l_{BC},\alpha a)-F(\alpha l_{AC},\alpha a)-F(\alpha l_{BD},\alpha a)] \tag{6-67}$$

式中 $M(\alpha a)$——无限长接近段互感系数，μH/km；

$F(\alpha l,\alpha a)$——校正系数，μH/km，可通过表 6-24 查取；

l_{AC}、l_{AD}、l_{BC}、l_{BD} ——图 6-30 所示的长度，km；

l_p ——接近段长度，km；

α 分别与 a 或 L 单位一致。

两线路间的互感系数，在大地电导率大的地区或两线路接近距离较大时，按无限长线路或有限长线路考虑其计算结果相差不多，一般在大地电导率小的地区考虑互感有限长校正系数。

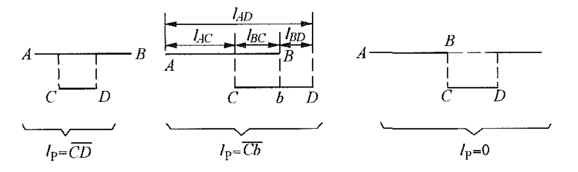


图 6-30 两有限长线路相对位置图

表 6-24 校正系数 $F(\alpha l,\alpha a)$ 表 （μH/km）

αa \ αl	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
0.001	141–j141	109–j134	90–j127	76–j120	64–j114	47–j102	35–j92	26–j83	19–j75
0.01	140–j141	109–j134	90–j127	76–j120	64–j114	47–j102	35–j92	26–j83	19–j75
0.1	131–j141	107–j134	89–j127	75–j120	63–j114	46–j102	35–j92	26–j83	19–j75
0.2	122–j140	102–j133	86–j126	73–j119	62–j113	46–j101	34–j91	25–j82	19–j74
0.4	105–j137	90–j130	78–j123	67–j117	58–j111	44–j100	32–j90	24–j81	18–j74
0.6	90–j134	79–j128	69–j121	60–j115	52–j109	40–j98	30–j88	23–j80	17–j73
1.0	64–j125	57–j119	51–j113	45–j108	40–j103	31–j93	24–j84	19–j77	14–j70
1.5	40–j111	36–j106	33–j101	29–j96	26–j93	21–j84	17–j76	13–j70	10–j64
2	24–j96	22–j92	20–j88	18–j84	16–j81	13–j75	11–j69	8–j63	6–j59
2.5	13–j83	12–j80	11–j77	10–j74	9–j71	7–j66	5–j61	5–j57	4–j53
3	7–j71	6–j68	5–j66	5–j64	4–j62	4–j58	3–j54	2–j51	1–j48
3.5	3–j62	3–j60	2–j58	2–j56	2–j54	1–j51	1–j48	1–j45	–j43
4	1–j53	1–j50	–j50	–j48	–j47	–j45	–j43	–j40	–j38
5	–j41	–j40	–j39	–j38	–j38	–j36	–j35	–j33	–j32
6	–j34	–j33	–j33	–j32	–j32	–j31	–j30	–j28	–j27
7	–j29	–j28	–j28	–j27	–j27	–j26	–j25	–j24	–j24
8	–j25	–j24	–j24	–j23	–j23	–j23	–j22	–j22	–j21
9	–j22	–j22	–j21	–j21	–j21	–j20	–j20	–j19	–j19
10	–j20	–j20	–j19	–j19	–j19	–j19	–j18	–j18	–j18

αa \ αl	1.6	2.0	2.5	3	3.5	4	5	6	7	8	9	10
0.001	11–j62	6–j51	3–j41	1–j34	–j29	–j25	–j20	–j17	–j14	–j12	–j11	–j10
0.01	11–j62	6–j51	3–j41	1–j34	–j29	–j25	–j20	–j17	–j14	–j12	–j11	–j10
0.1	11–j61	6–j51	3–j41	1–j34	–j29	–j25	–j20	–j17	–j14	–j12	–j11	–j10
0.2	10–j61	5–j51	3–j41	1–j34	–j29	–j25	–j20	–j17	–j14	–j12	–j11	–j10
0.4	10–j61	5–j51	2–j41	1–j34	–j29	–j25	–j20	–j17	–j14	–j12	–j11	–j10
0.6	9–j60	5–j50	2–j41	1–j34	–j29	–j25	–j20	–j17	–j14	–j12	–j11	–j10
1.0	8–j58	4–j49	2–j40	1–j34	–j29	–j25	–j20	–j17	–j14	–j12	–j11	–j10
1.5	6–j54	3–j46	1–j38	1–j33	–j28	–j24	–j20	–j17	–j14	–j12	–j11	–j10
2	4–j50	2–j43	1–j36	–j31	–j27	–j24	–j19	–j16	–j14	–j12	–j11	–j10
2.5	2–j46	1–j40	–j34	–j30	–j26	–j23	–j19	–j16	–j14	–j12	–j11	–j10
3	1–j42	–j37	–j32	–j28	–j25	–j22	–j18	–j16	–j14	–j12	–j11	–j10
3.5	–j38	–j34	–j30	–j27	–j24	–j22	–j18	–j15	–j14	–j12	–j11	–j10
4	–j35	–j31	–j28	–j25	–j23	–j21	–j17	–j15	–j14	–j12	–j11	–j10
5	–j29	–j27	–j24	–j22	–j20	–j19	–j16	–j14	–j13	–j12	–j11	–j10
6	–j25	–j24	–j22	–j20	–j19	–j18	–j15	–j14	–j13	–j11	–j10	–j9
7	–j22	–j21	–j20	–j19	–j18	–j17	–j15	–j13	–j12	–j11	–j10	–j9
8	–j20	–j19	–j18	–j17	–j17	–j16	–j14	–j12	–j11	–j10	–j9	–j9
9	–j18	–j18	–j17	–j16	–j15	–j14	–j13	–j12	–j11	–j10	–j9	–j8
10	–j17	–j17	–j16	–j15	–j14	–j13	–j12	–j11	–j10	–j10	–j9	–j8

（二）磁感应纵电动势

1. 磁感应纵电动势通用计算公式

通常电信线路与输电线路不可能是单一的平行接近、斜接近或交叉，而是接近距离呈曲折变化的复杂接近，如图 6-31 所示。这时可将整个线路分成若干个平行、斜接近和交叉的等效接近段来代替各段线路，这样由影响电流在电信线路导线上感应产生的纵电动势为每个接近段上感应纵电动势的代数和，其计算式为

$$\left.\begin{aligned}E&=\sum_{i=1}^{n}\omega M_i l_{pi} I_s k_n\\ \omega&=2\pi f\end{aligned}\right\}\qquad(6\text{-}68)$$

式中　E——电信线路上的磁感应纵电动势，V；

ω——影响电流角频率，rad/s；

f——影响电流的频率，Hz，交流输电线路影响电流频率为 50Hz，直流输电线路影响电流频率为 30Hz；

M_i——输电线路与电信线路间第 i 段互感系数，H/km；

l_{pi}——输电线路与电信线路间第 i 段接近段长度，km；

I_s——对于交流输电线路是一相接地短路或两相在不同地点同时接地的短路电流；对于直流输电线路是一极导线在不同地点接地，短路电流各频率分量的加权值之和，A；

k_n——接近段内各种导体的综合磁屏蔽系数，对于交流输电线路为 50Hz 时的屏蔽系数，对于直流输电线路为 30Hz 时的屏蔽系数。

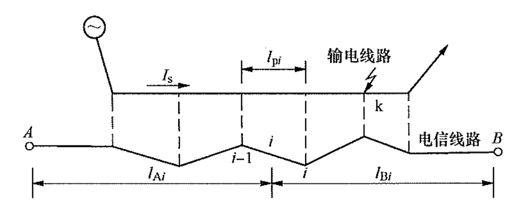


图 6-31　输电线路与电信线路相对位置示意图

对称的三相交流输电线路发生不对称短路时的故障电流（即影响电流），是指输电线路各相导线中电流的相量和，它是一个不平衡电流，在数值上等于沿着输电线路对应段的地中电流，其计算方法见本章第二节。《防止和解决电力线路对通信信号线路危险和干扰影响的原则协议》第 35 条规定：对于一般电信线路，取短路开始时电流交流分量的 70%作为影响电流；对于电缆线路、光缆线路和铁路半自动闭塞装置信号线路，则取 85%。

根据磁感应基本原理，当电信线路长度小于信号波长时，该电信线路可看作“电学上的短线路”，此时信号的传播现象可忽略不计。根据 DL/T 5033—2006《输电线路对电信线路危险和干扰影响防护设计规程》说明条文第 5.2.1 条规定，式（6-68）计算误差范围在 5%以内，对于架空电信明线的电学上短线路计算长度极限值为 235km，电信电缆对称芯线回路的电学上短线路计算长度极限值为 43km，可见忽略传播现象进行危险影响计算在一般工程设计中是可行的。

2. 直流输电线路产生的磁感应纵电动势简化计算公式

根据 DL/T 5340—2015《直流架空输电线路对电信线路危险和干扰影响防护设计技术规程》第 5.2.2 条规定，对于直流输电线路，当采用式（6-68）计算磁感应纵电动势有困难时，可按简化式（6-69）和式（6-70）计算。

（1）直流输电线路一极导线接地，来自整流站侧故障电流的磁感应纵电动势（峰值）为

$$E=U_d\left(\frac{1}{L_d+\sum_{i=0}^{n}l_{pi}L}+\frac{g_f\sum_{i=0}^{n}l_{pi}}{L_d l_D}\right)\sum_{i=1}^{n}M_i l_{pi} k_n\qquad(6\text{-}69)$$

（2）直流输电线路一极导线接地，来自逆变站侧故障电流的磁感应纵电动势（峰值）为

$$E=g_f\frac{U_d\left(l-\sum_{i=0}^{n}l_{pi}\right)}{L_d l_D}\sum_{i=1}^{n}M_i l_{pi} k_n\qquad(6\text{-}70)$$

式中　U_d——直流输电线路的工作电压，kV；

L_d——平波电抗器的电感量，H；

L——直流输电线路单极导线对地的电感量，H/km，可通过式（6-79）～式（6-85）计算获得；

g_f——直流输电线路结构系数（线路电容放电电流强度与整流站侧电源故障电流强度的比例系数），与导线储存的电荷直接相关，长度 1000km 左右的线路一般取 0.2～0.3，无资料取 0.25；

l_D——直流输电线路总长度，km。

平波电抗器用以平滑或减小直流线路电压和电流的波动，被视为直流滤波系统的一个组成部分。在逆变器故障和换相故障时，平波电抗器可以限制阀电流和电流升高速率，它可以在故障期间通过控制暂态电流限制故障的扩散。平波电抗器的电感量可以从换流站直流滤波器设计参数中查取。

3. 带增音机的电缆线路磁感应纵电动势计算

无人增音站采用了防护滤波器时，电信电缆上的磁感应纵电动势应以无人增音段长度计算。相邻无人增音段电信电缆线路上的磁感应纵电动势的累加，应考虑防护滤波器对磁感应影响的抑制衰减作用，可考虑在式（6-68）基础上乘以 1.1～1.2 的倍数。

4. 磁感应纵电动势计算长度的确定

（1）电信线路装设有隔离变压器时，应按隔离变压器分隔段长度单独计算。

（2）电信电缆线路在无人增音站采用了防护滤波器时，宜按无人增音段长度计算。

（3）电信电缆线路在无人增音站无防护滤波器时，宜按远供电源段长度计算。

（4）光缆线路按光缆金属线对或金属构件各段的实际长度计算。

（5）继电半自动的闭塞线路或自动闭塞的方向及报警电路，按相邻机车站间的闭塞线路长度计算。

（6）遥控、遥信线路应按实回线长度计算。

（三）磁感应对地电压

输电线路对邻近电信线路产生的磁感应对地电压，宜根据电信线路终端特性，选择下列不同的电信回路工作方式进行计算。电信线路工作方式主要有：电信回路一端是低阻抗接地，而另一端是高阻抗接地（开路）；电信回路两终端经低阻抗接地；电信回路两终端的导线与大地之间都是高阻抗（开路）三种。

（1）电信线路一端接地、一端绝缘，如图 6-31 所示，当 A 端接地时，A 端的磁感应对地电压为 0，B 端磁感应对地电压 U_B 等于磁感应纵电动势 E，其计算见式（6-68）。

（2）电信线路两端绝缘，如图 6-31 所示，由影响电流在电信线路上感应产生的两端对地电压等于各个接近段分别在两端产生的对地电压的代数和，其计算式为

$$U_A=\sum_{i=1}^{n}\omega M_i l_{pi} I_s k_n \frac{l_{Bi}}{l_s} \tag{6-71}$$

$$U_B=\sum_{i=1}^{n}\omega M_i l_{pi} I_s k_n \frac{l_{Ai}}{l_s} \tag{6-72}$$

式中 l_{Ai}——第 i 接近段中点至 A 端电信线路长度，km；

l_{Bi}——第 i 接近段中点至 B 端电信线路长度，km；

l_s——A 端至 B 端间电信线路的长度，km；

其他符号含义同式（6-68）。

电信线路沿线各点磁感应对地电压 U_i 为

$$U_i=U_{i-1}-E_i \tag{6-73}$$

式中 U_{i-1}——电信线路上第 $i-1$ 点的磁感应对地电压，V；

E_i——电信线路上第 i 段的磁感应纵电动势，V。

双向供电时，分别按单相供电计算，然后代数和相加。

（3）电信线路两端接地，即两侧电信终端局避雷器动作，两接地点间电信导线对地电压的计算如下：

如图 6-32 所示的等效电路，当输电线路为双侧供电时、一般 $E_1 \neq E_2$、I_p 为感应纵电动势在电信回路与大地所形成的回路上产生的电流，u_x 为

$$\left.\begin{aligned} u_x&=E_1-I_p(Z_n l_1+R_1)\\ \text{或}\quad u_x&=E_2+I_p(Z_n l_2+R_2)\end{aligned}\right\} \tag{6-74}$$

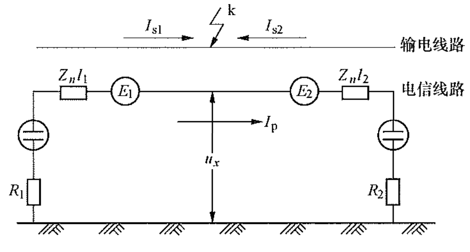


图 6-32 放电管保护等效电路图

解式（6-74），可得

$$u_x=\frac{E_1 l_2+E_2 l_1}{l_1+l_2}+\frac{\pm U_2 l_1 \mp U_1 l_2}{l_1+l_2} \tag{6-75}$$

式中 u_x——对应输电线路故障点 k 的电信线路磁感应对地电压，V；

l_1、l_2——电信线路与输电线路故障点的对应点到两端局的距离，km；

E_1、E_1——l_1、l_2 两段电信线路上的磁感应纵电动势，V；

R_1、R_2——电信线路两终端局避雷器接地电阻，Ω；

U_1、U_2——电信线路两终端局避雷器接地电阻压降，V；$U_1=I_pR_1$，$U_2=I_pR_2$。

当 $E_1>E_2$ 时，U_1 取负值；当 $E_2>E_1$ 时，U_2 取负值。

如设电信线路两端接地电阻为 0 时，则式（6-75）可简化成：

$$u_{0x}=\frac{E_1 l_2+E_2 l_1}{l_1+l_2} \tag{6-76}$$

当输电线路为单侧供电时：

$$u_{0x}=\frac{E_1 l_2}{l_1+l_2} \quad \text{或} \quad u_{0x}=\frac{E_2 l_1}{l_1+l_2} \tag{6-77}$$

（4）电信线路装有多处放电器、并计入放电管接地电阻上的压降时，电信线路上与输电线路短路点相对应点处的对地电压

$$u_x=\frac{E_1 l_{T2}+E_2 l_{T1}}{l_{T1}+l_{T2}}+\frac{1}{4}(U_i+U_{i+1}) \tag{6-78}$$

式中 l_{T1}、l_{T2}——电信线路与输电线路故障点的对应点到相邻两放电器间的电信线路长度，km；

E_1、E_2——l_{T1}、l_{T2} 两段电信线路上的磁感应纵电动势，V；

U_i、U_{i+1}——相邻两放电器在对应放电器处输电线路发生短路时的接地电阻上的电压降，V。

（四）直流输电线路导线对地电感量

根据 DL/T 5340—2015《直流架空输电线路对电信线路危险和干扰影响防护设计技术规程》附录 B 内容，直流输电线路导线对地电感量按如下情况计算。

（1）极导线为单导线的直流输电线路发生接地时，故障回路导线对地电感量可按下式计算：

$$L=\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{2h_b}{r_m}+\frac{\mu_0}{2\pi}V_{11} \tag{6-79}$$

$$r_m=e^{-\frac{1}{4}}r=0.779r_d \tag{6-80}$$

$$\lambda=2h_b\sqrt{2\pi f\mu_0\sigma} \tag{6-81}$$

式中 L ——直流输电线路故障回路导线对地电感量，H/m；

μ_0 ——真空磁导率，$\mu_0=4\pi\times10^{-7}$，H/m；

r_m ——圆柱形导线的等值半径，亦称自几何半径，m；

r_d ——导线的所在圆周半径，m；

h_b ——故障回路导线平均对地高度，m；

σ ——大地电导率，S/m；

f ——影响电流的视在频率，取 30Hz；

λ ——卡尔松积分参数；

V_{11} ——卡尔松积分中的无因次子。

常用多股导线的 r_m 与 r_d 的计算关系可按表 6-25 取值。

表 6-25 多股导线的 r_m 与 r_d 的计算关系

导线种类		r_m
有色金属绞线	7 股	$0.726r_d$
	19 股	$0.758r_d$
	37 股	$0.768r_d$
	61 股	$0.772r_d$
	91 股	$0.774r_d$
钢芯铝绞线（约为）		$0.81r_d$
空芯有色金属绞线及忽略钢芯影响的钢芯铝绞线	两层 26 股	$0.809r_d$
	两层 30 股	$0.826r_d$
	三层 54 股	$0.81r_d$
单层钢芯铝绞线		$0.35r_d$～$0.70r_d$

卡尔松积分中的无因次子 V_{11}，可通过计算卡尔松积分参数 λ 后查表 6-26 取值。

表 6-26 卡尔松积分无因次子 V_{11} 的值

λ	V_{11}	λ	V_{11}	λ	V_{11}	λ	V_{11}	λ	V_{11}	λ	V_{11}
0.01	5.2258	0.26	2.0794	0.51	1.5074	0.76	1.2019	1.02	0.9973	1.52	0.7530
0.02	4.5373	0.27	2.0459	0.52	1.4919	0.77	1.1924	1.04	0.9845	1.54	0.7456
0.03	4.1365	0.28	2.0138	0.53	1.4767	0.78	1.1831	1.06	0.9720	1.56	0.7385
0.04	3.8535	0.29	1.9829	0.54	1.4619	0.79	1.1739	1.08	0.9599	1.58	0.7314
0.05	3.6350	0.30	1.9532	0.55	1.4474	0.80	1.1649	1.10	0.9480	1.60	0.7245
0.06	3.4573	0.31	1.9246	0.56	1.4332	0.81	1.1560	1.12	0.9365	1.62	0.7177
0.07	3.3077	0.32	1.8970	0.57	1.4193	0.82	1.1473	1.14	0.9252	1.64	0.7111
0.08	3.1788	0.33	1.8704	0.58	1.4058	0.83	1.1387	1.16	0.9142	1.66	0.7045
0.09	3.0655	0.34	1.8447	0.59	1.3925	0.84	1.1302	1.18	0.9034	1.68	0.6981
0.10	2.9647	0.35	1.8198	0.60	1.3794	0.85	1.1219	1.20	0.8929	1.70	0.6918
0.11	2.8739	0.36	1.7958	0.61	1.3667	0.86	1.1136	1.22	0.8827	1.72	0.6856
0.12	2.7914	0.37	1.7725	0.62	1.3542	0.87	1.1056	1.24	0.8727	1.74	0.6795
0.13	2.7158	0.38	1.7499	0.63	1.3419	0.88	1.0976	1.26	0.8629	1.76	0.6735
0.14	2.6462	0.39	1.7280	0.64	1.3299	0.89	1.0897	1.28	0.8533	1.78	0.6677
0.15	2.5817	0.40	1.7067	0.65	1.3181	0.90	1.0820	1.30	0.8439	1.80	0.6619
0.16	2.5215	0.41	1.6861	0.66	1.3066	0.91	1.0744	1.32	0.8348	1.82	0.6562
0.17	2.4653	0.42	1.6660	0.67	1.2952	0.92	1.0669	1.34	0.8258	1.84	0.6506
0.18	2.4126	0.43	1.6465	0.68	1.2841	0.93	1.0595	1.36	0.8170	1.86	0.6451
0.19	2.3629	0.44	1.6275	0.69	1.2732	0.94	1.0522	1.38	0.8084	1.88	0.6397
0.20	2.3159	0.45	1.6090	0.70	1.2624	0.95	1.0450	1.40	0.8000	1.90	0.6344
0.21	2.2715	0.46	1.5910	0.71	1.2519	0.96	1.0379	1.42	0.7918	1.92	0.6292
0.22	2.2293	0.47	1.5734	0.72	1.2416	0.97	1.0309	1.44	0.7837	1.94	0.6240
0.23	2.1892	0.48	1.5563	0.73	1.2314	0.98	1.0240	1.46	0.7758	1.96	0.6189
0.24	2.1509	0.49	1.5396	0.74	1.2214	0.99	1.0172	1.48	0.7680	1.98	0.6140
0.25	2.1144	0.50	1.5233	0.75	1.2116	1.00	1.0105	1.50	0.7604	2.00	0.6090

（2）极导线为分裂导线的直流输电线路发生接地时，故障回路导线对地电感量可按下式计算：

$$L=\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{2h_b}{D_s}+\frac{\mu_0}{2\pi}V_{11} \tag{6-82}$$

分裂导线的自几何均距与其分裂间距及导线分裂根数有关，由于分裂导线总是布置在正多边形的顶点上，所以自几何均距 D_s 可按下列公式计算：

$$D_s=\sqrt[m]{B_m r_m d_m^{m-1}} \tag{6-83}$$

$$B_m=\frac{m}{[2\sin(\pi/m)]^{m-1}} \tag{6-84}$$

式中 D_s ——故障回路分裂导线的自几何均距，m；

m ——分裂导线中子导线的根数；

B_m ——与分裂导线束中子导线数 m 有关的系数；

d_m ——分裂导线按正多角形排列时的分裂间距，m。

各种分裂导线自几何均距的计算关系可按表 6-27 取值。

表 6-27　m=2～12 的 D_s 计算式

导线分裂根数 m	几何均距 D_s
m=2	$D_s=\sqrt[2]{1.00r_m d_m^{2-1}}$
m=3	$D_s=\sqrt[3]{1.00r_m d_m^{3-1}}$
m=4	$D_s=\sqrt[4]{1.414213r_m d_m^{4-1}}$
m=5	$D_s=\sqrt[5]{2.618034r_m d_m^{5-1}}$
m=6	$D_s=\sqrt[6]{6.00r_m d_m^{6-1}}$
m=7	$D_s=\sqrt[7]{16.39373r_m d_m^{7-1}}$
m=8	$D_s=\sqrt[8]{51.99989r_m d_m^{8-1}}$
m=9	$D_s=\sqrt[9]{187.754r_m d_m^{9-1}}$
m=10	$D_s=\sqrt[10]{760.1317r_m d_m^{10-1}}$
m=11	$D_s=\sqrt[11]{3409.749r_m d_m^{11-1}}$
m=12	$D_s=\sqrt[12]{16783.9r_m d_m^{12-1}}$

（3）极导线为分裂导线的直流输电线路发生接地时，在获取相关参数有困难的情况下，式（6-82）可按下式简化计算：

$$L=\frac{\mu_0}{2\pi}\times\left[\ln\frac{1.8514}{D_s\sqrt{2\pi f\mu_0\sigma}}+\frac{4h_b\sqrt{\pi f\mu_0\sigma}}{3}\right] \tag{6-85}$$

（五）计算中注意事项

在计算纵电动势时，应根据电信线路的具体情况，确定每个电路电气连接段的起止点，算出电路任意两点间感应纵电动势最大值。一般可选择输电线路对应计算区段两端的地点短路，此时 $\sum\omega Ml_p$ 为计算区段的全互感阻抗，所得的感应纵电动势较大。但如电信线路和输电线路接近、交叉情况复杂，使互感阻抗集中在接近段内某一局部，或在电信电路上有正、负不同的感应电动势出现，以及对应计算区段输电线路的影响电流变化率较大时，则应在输电线路中间再选取几个短路点进行计算，以求得电信电路上感应的最大纵电动势值。

现以第九节计算实例对以上问题做如下具体说明：

该例输电线路与电信线路平行接近、交叉跨越和回线运用情况等如图 6-59 所示，图中注明了大地电导率的分段和采用数值。

为进行输电线路与电信线路之间互感阻抗计算，全线共划分 15 个区段，其中⑩、⑪、⑭和⑮为交叉段，①、⑤和⑥段为平行接近段，其余各段为斜接近段。由于 $\frac{E_e}{C_c}$ 的比值大于 3，所以增加 D—d 分段线。由于 F 点是大地电导率的分界点，出于计算上的考虑而补加了 F—f 分段线。g 点是分线杆，某些电路在此处进入乙站中断，为了便于各电信电路的纵电动势计算而增加 G—g 分段线。

如果在输电线路上通过的影响电流为 I_s，其方向是由甲发电厂流向乙变电站，根据式（6-68）可以计算各接近段的感应纵电动势和总的电动势。根据电磁感应定律对图6-59中各段的纵电动势计算做如下分析：

（1）hh′线段是受 GH 和 HI 两线段同时感应的重叠感应段。由于 gh′（GH 线段感应）和 hi（HI 线段感应）线段上的感应纵电动势方向相同，所以 hh′线段上的纵电动势值是相加的。

（2）从⑭和⑮两段上来看，n′o（或 PO）线段也是属于重叠感应段，由于 n′o（NO 线段感应）和 po（PO 线段感应）线段上的感应纵电动势方向相反，所以 n′o 线段上的纵电动势值是相减的。如果输电线路的接地故障点取在 O 点上，如图 6-33 所示，则 n′o 和 po 线段上感应的纵电动势方向（$1E_{po}$ 和 $E_{n'o}$）相同，n′o 线段上的纵电动势值应是相加的。当然这段电信线路还受输电线路 MN 段的感应影响，其感应纵电动势 E_{mn} 与 E_{no} 方向相同。

（3）lm 段是电信线路反向转折点，该段上感应纵电动势与 ab、bc…等段上感应纵电动势方向相反。

（4）ii′段不受任何感应影响，因此这个线段上没有感应电压。

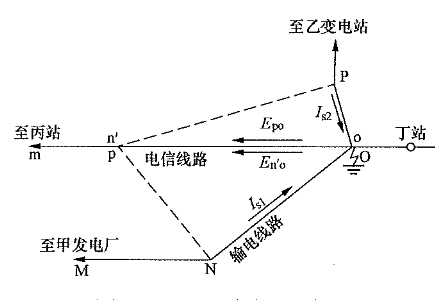


图 6-33 重叠感应段计算图

互感阻抗本身并无正负之分，但与电流联系起来的电动势就有方向问题了。为了区分纵电动势的方向，在互感阻抗计算中常常冠以“+”“−”符号作为标记，⑫和⑮段的互感阻抗标为“−”，其他各段标为“+”。

以上对感应纵电动势的方向等问题做了简要分析，在计算中还必须确定哪几个电信回路要计算、计算起止点和找出最大感应纵电动势。输电线路与电信线路接近位置图一般只能表明两者相对位置关系，说明不了电信线路上各对导线的起止点、断开点和回线用途等情况，这些情况只能从回线运用图中说明。图6-59中的回线图说明从甲站到丁站电信线路共有六个电路，要对六个电路分别进行纵电动势计算。

对于电路Ⅰ，因丙站设有增音机，纵电动势计算区段的起止点应为甲站～丙站和丙站～丁站。纵电动势计算区段划分的依据是电路对 50Hz 的感应纵电动势是否能构成通路，凡是对 50Hz 的感应纵电动势构成通路的都要作为一个电气连接段来计算纵电动势。

在计算纵电动势时必须在输电线路上移动短路点，找出电信线路上任何两点间的最大感应纵电动势，例如图 6-59 中：

电路Ⅱ，输电线路 C 点接地短路时，感应纵电动势 E_{ac} 就有可能大于 G 点接地时的 E_{ag}。

电路Ⅵ，输电线路 L 点接地时，$E_{gm}=E_{gh}+E_{h'i}+E_{i'j}+E_{jk}+E_{kl}-E_{lm}$； 输电线路 J 点接地短路时，$E_{lj}=E_{lk}+E_{kj}$，$E_{lj}$ 就有可能大于 E_{gm}。

电路Ⅴ，输电线路 P 点接地短路时，$E_{mo}=E_{mn}+E_{n'o}-E_{op}$；输电线路 O 点接地短路时，$E'_{mo}=E_{mn}+E_{n'o}+E_{op}$；此时 $E'_{mo}>E_{mo}$。

通过以上计算可以找出各个电路的最大感应纵电动势。同理，根据对地电压计算公式也可以计算出电信导线最大对地电压，最后确定电信线路是否存在危险影响。对以上问题将在第九节计算例中通过数据说明。

三、电危险影响

中性点不直接接地系统三相对称交流输电线路发生单相接地故障时，对架空明线电信线路产生电影响，当人接触对地绝缘电信导线时，流经人体的电感应电流按以下各式进行计算。

（一）判别式

输电线路与电信线路的全部接近长度 l_p 中，若接近距离全部大于下列计算值时，容性耦合危险影响可忽略不计，当频率为 50Hz 时，接近距离为

$$a=\frac{1}{12}\sqrt{U_r l_p} \qquad (6\text{-}86)$$

式中 U_r——输电线路的额定电压，V。

（二）电感应人体电流计算式

当输电线路与电信线路间的距离不能全部大于按式（6-86）计算的 a 值时，就应计算电信线路上由电感应产生的对地放电电流，但可不必计算两线路之间的距离大于 $a=\frac{1}{4}\sqrt{U_r l_p}$ 的那些接近段。由容性耦合引起的流经人体的电流

$$I_b=18\times\frac{m_1}{m_1+m_3+2}\times fU_r\left[\sum n(a)l_T kq_1q_2+\sum\frac{N(a_B)\pm N(a_A)}{a_B\pm a_A}l_T kq_1q_2\right]\times10^{-6} \qquad (6\text{-}87)$$

式中 m_1——人体接触对地绝缘的电信回路导线数，如双线回路 $m_1=2$，双幻回路 $m_1=4$；

m_3——电信线路接地导线数（系指单线电话、单线电报和幻象电报等）；

f——输电线路电压频率，Hz；

U_r——输电线路的额定线电压，V；

$n(a)$——平行段电耦合系数的函数，应按表 6-28 选用；

l_T——接近段内电信线路长度，km；

k——输电线路地线屏蔽系数，有地线时取 0.75；

q_1、q_2——树木屏蔽系数，距输电线路、电信线路在 3m 以内有连续树木时取 0.7；

$N(a_A)$、$N(a_B)$——斜接近或交叉跨越段耦合系数的函数，应按表 6-28 选取；

a_A、a_B——输电线路与电信线路间斜接近段或交叉跨越段两端的距离，m。在斜接近情况下，若 $\frac{a_A}{a_B}$ 的比值是在 $\frac{1}{3}$ 与 3 之间，可按平均接近距离为 $a=\pm\sqrt{a_Ba_A}$ 的平行情况考虑。

表 6-28　　$n(a)$、$N(a)$函数表达式

条件 / 函数	$a>0\left\{\begin{array}{l}\left\lvert\dfrac{h_b+h_c}{a}\right\rvert>0.1\\ \left\lvert\dfrac{h_b-h_c}{a}\right\rvert>0.1\end{array}\right.$	$a>0\left\{\begin{array}{l}\left\lvert\dfrac{h_b+h_c}{a}\right\rvert<0.1\\ \left\lvert\dfrac{h_b-h_c}{a}\right\rvert<0.1\end{array}\right.$
$n(a)$	$\ln\sqrt{\dfrac{a^2+(h_b+h_c)^2}{a^2+(h_b-h_c)^2}}$	$\dfrac{1}{2}\left[\left(\dfrac{h_b+h_c}{a}\right)^2-\left(\dfrac{h_b-h_c}{a}\right)^2\right]$
$N(a)$	$a\left[\ln\sqrt{\dfrac{a^2+(h_b+h_c)^2}{a^2+(h_b-h_c)^2}}+\dfrac{h_b+h_c}{a}\times\arctan\dfrac{a}{h_b+h_c}-\dfrac{h_b-h_c}{a}\arctan\dfrac{a}{h_b-h_c}\right]$	$a\left\{1.571\times\left(\dfrac{h_b+h_c}{a}-\dfrac{h_b-h_c}{a}\right)-\dfrac{1}{2}\left[\left(\dfrac{h_b+h_c}{a}\right)^2-\left(\dfrac{h_b-h_c}{a}\right)^2\right]\right\}$

注　a —输电线路与电信线路间任意点接近距离，m；
h_b —输电线路导线对地平均高度，m；
h_c —电信线路导线对地平均高度，m。

四、地电位升

输电线路发生接地故障时，不平衡电流通过接地点流入大地，由于接地回路存在电阻，因此使大地上各点产生电位差，有时这个电位差可高达数千伏，它主要集中在电流入地点附近，一般为200～300m范围内，较远的距离所占分量较小，可以忽略。

接地装置的电位升和大地电位分布与流入接地装置的电流大小、接地装置型式和大地电阻率有关。输电线路与地埋电缆线路、地埋光缆线路接近时，计算电缆芯线或光缆金属线对、金属构件与大地间引起的电位差、电信局（站）接地装置上的地电位升，应按中性点直接接地三相对称交流输电线路发生一相接地短路故障、直流线路单极运行方式下极导线接地短路或双极运行方式下一极导线接地短路故障时流过杆塔接地装置的短路电流计算。接地装置附近某一点的电位 U_P 可根据以下公式进行计算。

大型接地装置——发电厂和变电站的接地装置如图 6-34（a）所示，附近 P 点电位 U_P 为

$$U_P=\frac{I_s\rho}{2\pi r_j}\arcsin\frac{r_j}{r_j+s_j} \tag{6-88}$$

小型接地装置——杆塔接地装置如图 6-34（b）所示，附近 P 点电位 U_P 为

$$U_P=\frac{I_s\rho}{2\pi r_j}\times\frac{r_j}{s_j} \tag{6-89}$$

式中　I_s——经接地装置流入地中的电流，A；
ρ ——大地电阻率，Ω·m；
r_j——接地装置计算半径，m；
s_j——自接地装置边缘至计算点 P 的距离，m。

对于有架空地线的输电线路，考虑到接地短路电流经地线从多基杆塔的接地装置流入大地，如图 6-34（b）所示，P 点电位应同时考虑多个接地装置电位升的影响，则 U_P 按下式计算：

$$U_P=\sum_{i=1}^{n}\frac{I_{si}\rho}{2\pi r_{ji}}\times\frac{r_{ji}}{r_{ji}+s_{ji}} \tag{6-90}$$

式中符号含义同式（6-89），但指的是第 i 基杆塔的数值。

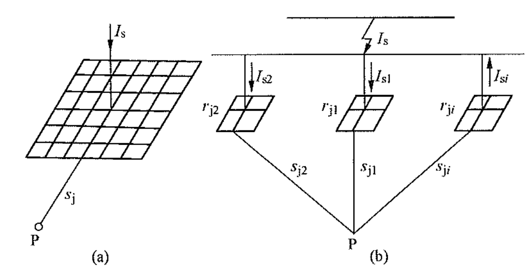


图 6-34　地电位计算说明图
（a）发电厂、变电站及无地线杆塔接地装置；
（b）有地线的杆塔接地装置

式（6-88）是以圆板电极推算出来的，式（6-89）是以半球形电极推算出来的。在实际工程中这两种电极很少有，可认为发电厂、变电站接地装置面积大，近似于圆板电极；杆塔接地装置面积小，近似于半圆球电极。

对于人身和设备构成危险影响的是电位差，既然能求得大地上任一点电位，那么任何两点电位之间的差值就是电位差。

根据《架空电力线路与弱电流线路接近和交叉装置规程》第 15 条规定，地埋电信电缆线路至架空电力线路最近杆塔接地装置边缘的最小允许距离，当土壤电阻率 $\rho<500\Omega\cdot m$ 时，不应小于 25m；土壤电阻率

$\rho > 500\Omega \cdot m$ 时，不应小于 50m。如果电信电缆线路与电力线路接地装置之间采用钢管隔离，上述距离可适当缩小。当没有明确规定时，地埋光缆可参照以上规定执行。

五、危险影响计算相关说明

输电线路对地埋电信电缆线路和地埋光缆线路同时产生感性耦合和阻性耦合两种影响时，应按两者平方和的平方根计算合成影响。

根据 DL/T 5033—2006《输电线路对电信线路危险和干扰影响防护设计规程》第 5.1.9 条规定，对非电气化铁道的半自动、自动闭塞方向电路及遥控、遥信线路的危险影响计算宜与电信线路相同。对非电气化铁道信号自动闭塞区间的交流轨道电路和对电气化铁道的铁路信号线，可不考虑危险影响。

在增音机、分线箱、分线盒等处装有放电器防护的电信线路，应考虑当放电器动作时，电信线路的对地电压。

第五节 干扰影响计算

在电力系统中，由于发电机输出电压的非正弦性和存在着非线性阻抗的电气设备，因而在输电线路工作电压和电流中含有谐波。根据测量和分析表明，音频波段的谐波是电话回路产生干扰影响的根源之一。输电线路对电报回路的干扰影响主要是由输电线路的基波电压和电流产生的。本章主要介绍了干扰影响的允许值、干扰影响简化计算、双线电话回路噪声计电动势及单线电报回路干扰电流计算等内容。

一、噪声计电压和噪声计电动势

人耳话机具有一种特性，就是对不同频率有不同的灵敏度，对 30、50Hz 的电流和电压，灵敏度很低，而对于 800Hz 的电流和电压，灵敏度则很高。在计算噪声电压时，一般以 800Hz 为基准，将不同频率的感应电压折算到 800Hz，用下列公式表示

$$U_{p(Zc)} = \frac{1}{P_{800}}\sqrt{\sum(P_f U_f)^2} \tag{6-91}$$

式中 $U_{p(Zc)}$——折算到频率为 800Hz 的噪声电压，它等于在电话机的两端接入与电话回路特性阻抗（Z_c）相等的纯电阻，用噪声计在此电阻上测得的电压，V；

U_f——电话机端子上频率为 f 的感应电压值，V；

P_f——频率为 f 的噪声加权系数，其值见表 6-29；

P_{800}——频率为 800Hz 时噪声加权系数，P_{800}=1000。

表 6-29 噪声加权系数频率

频率（Hz）	P_f	频率（Hz）	P_f	频率（Hz）	P_f
50	0.71	1000	1122	2250	661
100	8.91	1050	1109	2350	643
150	35.5	1100	1072	2450	625
200	89.1	1150	1035	2550	607
250	178	1200	1000	2650	590
300	295	1250	977	2750	571
350	376	1300	955	2850	553
400	484	1350	928	2950	534
450	582	1400	905	3000	525
500	661	1450	881	3200	473
550	733	1500	861	3400	412
600	794	1550	842	3600	335
650	851	1600	824	3800	251
700	902	1650	807	4000	178
750	955	1750	775	4200	116
800	1000	1850	745	4400	72.4
850	1035	1950	720	4600	43.7
900	1072	2050	698	4800	26.3
950	1109	2150	679	5000	15.9

输电线路对电话回路的干扰影响程度是以电话回路感应的噪声计电动势 e 来衡量，其值是指在电信线路终端 600Ω 的纯电阻上所测得的噪声计电压的两倍值，即 $e=2U_{p(600)}$。当线路特性阻抗不是 600Ω 而是 Z_c 时，如式（6-91）所述情况，式中杂音电压 $U_{p(Zc)}$ 可通过式（6-92）进行换算，换算成在纯电阻 600Ω 上的噪声计电压值 $U_{p(600)}$。

$$U_{p(600)} = U_{p(Zc)}\sqrt{\frac{600}{Z_c}} \tag{6-92}$$

式中 $U_{p(Zc)}$——回路两端均连接等于特性阻抗值的纯电阻，用噪声计在此电阻上测得的电压，V；

Z_c——电话回路的特性阻抗，Ω。

在音频电话回路的远端接入一个与该回路特性阻抗相等的纯电阻，在近端连接一个 600Ω 纯电阻（如果回路特性阻抗不是 600Ω 时，利用变量器进行匹配），这时在 600Ω 纯电阻上用噪声计测得的电压即为噪声计电压。噪声计电动势是音频电话回路两端的噪声计电压绝对值之和。

二、干扰影响允许值

（一）交流输电线路对电信线路干扰影响允许值

根据 DL/T 5033—2006《输电线路对电信线路危险和干扰影响防护设计规程》第 4.2 节规定，交流输电线路对电信线路的干扰影响允许值如下：

（1）音频双线电话回路噪声计电动势允许值符合下列规定：

1）县电话局至县及以上电话局的电话回路为4.5mV。

2）县电话局至县以下电话局的电话回路为10mV。

3）业务电话回路为7mV。

（2）兼作电话用有线广播双线回路噪声计电动势允许值为10mV。

（3）输电线路在“线—地”电报回路中感应产生流过电报机的干扰电流允许值为电报机工作电流的10%。

（二）直流输电线路对电信线路干扰影响允许值

根据DL/T 5340—2015《直流架空输电线路对电信线路危险和干扰影响防护设计技术规程》第4.2节规定，直流输电线路对电信线路干扰影响允许值见表6-30。

表6-30　电话回路噪声计电动势允许值

敏感系数η	噪声计电动势（mV）
$\eta \geq 5‰$	4.5
$5‰ > \eta > 1‰$	2.0
$\eta \leq 1‰$	1.0

业务电话回路噪声计电动势允许值应为7mV。

三、干扰影响计算的简化内容

电话回路中的噪声电压是由输电线路的基波和各次谐波电流和电压的感应而产生的。欲计算电话回路的噪声电压，就要逐一求出输电线路每个谐波分量，然后再计算每个谐波分量在电话回路上产生的噪声电压。显然，这样计算是非常繁杂的。为计算简单，通常是用等效干扰电流和等效干扰电压来计算。在输电线路中流过800Hz的电流，使在邻近的电话回路中所引起的噪声计电动势与该线路内实际存在的各次谐波电流所引起的噪声计电动势相等，该电流称为等效干扰电流。在输电线路上加以800Hz的电压，使在邻近的电话回路中所引起的噪声计电动势与该线路内实际存在的各次谐波电压所引起的噪声计电动势相等，该电压称为等效干扰电压。等效干扰电流和等效干扰电压在电话机中所产生的噪声值和输电线路各次谐波电流和电压在电话机中所产生的噪声值相同。

输电线路在正常运行情况下相导线上的电压和电流一般是不对称的，它包含有平衡分量和剩余分量。因此，干扰影响计算中必须考虑电压、电流的平衡分量和剩余分量。

电信回路两导线与输电线路三相（或两相）导线几何位置不对称引起的磁感应和电感应干扰影响，导致两导线上感应的对地电压不相等，产生均衡电流，称为环路影响。同时，电信回路两导线的导纳、阻抗的不平衡所引起的磁感应和电感应干扰影响，致使相同幅值和相位的电压传到话机的端点，两导线的对地电压也不相同，因而产生不平衡电流，称为不平衡影响。基于输电线这个干扰源中电压和电流有四个分量，而双线电话又存在着环路影响和不平衡影响，故双线电话回路中的噪声计电动势，可分解为以下八个分量：

（1）由平衡电压分量和环路影响引起的噪声计电动势e_{bv1}；

（2）由平衡电压分量和不平衡影响引起的噪声计电动势e_{bv}；

（3）由平衡电流分量和环路影响引起的噪声计电动势e_{bI1}；

（4）由平衡电流分量和不平衡影响引起的噪声计电动势e_{bI}；

（5）由剩余电压分量和环路影响引起的噪声计电动势e_{rv1}；

（6）由剩余电压分量和不平衡影响引起的噪声计电动势e_{rv}；

（7）由剩余电流分量和环路影响引起的噪声计电动势e_{rI1}；

（8）由剩余电流分量和不平衡影响引起的噪声计电动势e_{rI}。

总的噪声计电动势为各分量的二次和的开方，即均方根值。

但实际上，由于输电线路运行方式不同，例如：中性点直接接地的三相对称输电线路，它的剩余电压分量U_{r0}近似为零；中性点不直接接地的三相对称输电线路的剩余电流分量I_{r0}近似为零。这样，在对双线电话的干扰计算中，最多只需考虑六个分量。这六个分量随着输电线路与电信线路的接近距离以及大地电导率等因素的不同，各分量所占的比重差异很大。例如中性点直接接地的三相输电线路与电信线路之间的距离受磁危险影响控制，一般距离都在数百米以上。通过实测和计算比较可以得出：电信线路不平衡影响引起的噪声要比环路影响引起的噪声大十到几十倍，对以上这些相对来说较小的分量在实际工程计算中是完全可以忽略不计的。

根据DL/T 5033—2006《输电线路对电信线路危险和干扰影响防护设计规程》条文说明　第6.1.5条规定，在计算中性点直接接地的三相对称交流输电线路对双线电话电信线路的干扰影响时，一般只需考虑不平衡影响的3个噪声分量即可。根据DL/T 5340—2015《直流架空输电线路对电信线路危险和干扰影响防护设计技术规程》条文说明　第6.1.2条规定，一般情况

下直流输电线路对双线电话回路的干扰影响可只考虑不平衡干扰影响，同时对于直流线路与电信线路通常的接近状况，可忽略基波和谐波电压的感应影响，这样直流输电线路对电信线路的干扰影响可只考虑不平衡影响的 2 个噪声计分量。根据以上分析输电线路对电信线路的干扰影响计算一般可简化见表 6-31。

表 6-31 输电线路对电信线路干扰影响计算公式索引表

输电线路运行方式 / 通信方式	三相对称交流输电线路			直流输电线路
	中性点直接接地系统	中性点不直接接地系统		
	正常运行	正常运行	一相故障	正常运行
双线电话	$e=\sqrt{e_{bv}^2+e_{bI}^2+e_{rI}^2}$ 式（6-96）～式（6-100）	$e=\sqrt{e_{bv}^2+e_{bI}^2}$ 式（6-101）	$e=e_{rv}$ 式（6-102）	$e=\sqrt{e_{rI}^2+e_{bI}^2}$ 式（6-103）～式（6-109）
单线电报	$I=\sqrt{I_{bv}^2+I_{bI}^2+I_{rI}^2}$ 式（6-110）～式（6-113）	$I=I_{bv}$ 式（6-114）	$I=I_{rv}$ 式（6-115）	—

不平衡影响的 3 个噪声分量，随着输电线路和电信线路的架设高度、接近距离以及大地电导率等因素的不同，各分量所占比重也不同。在中性点直接接地系统中，当输电线路与电信线路接近距离 a 在 100～200m 时，电感应分量的影响在总噪声中占有较大比重。但随着接近距离 a 的逐渐增大，电感应分量急剧下降，磁感应分量上升为主要分量。其中电流平衡分量又比电流剩余分量随 a 的增大而衰减得更快，因此当接近距离 a 大于 300～600m 时，实际上剩余电流分量已上升为主要影响分量。因此在工程设计中往往磁影响是主要的，而电影响却可略之。所以根据工程具体情况，双线电话噪声计电动势也可进一步简化为：$e=(1.05\sim1.25)e_{rI}$。值得指出的是，上述简化只适用于输电线路与电信线路接近距离较大的情况，若接近距离较小时，应按表 6-31 计算噪声计电动势，否则将导致较大误差。

中性点直接接地系统的输电线路计算干扰影响时，对音频双线电话回路的干扰影响应按输电线路正常运行状态计算，应考虑输电线路基波和谐波电流、电压的感应影响；对线—地电报回路的干扰影响应按输电线路正常运行状态计算，应考虑输电线路基波电流、电压的感应影响；对受多条输电线路干扰影响的电信线路，应按平方和的平方根计算多条输电线路的合成干扰影响。

中性点不直接接地系统的输电线路发生单相接地短路故障时，输电线路还能短时间运行，此时故障相的相电压升为线电压，输电线路由对称系统变为不对称系统，使输电线路的电压剩余分量成为干扰影响的主要成分，故对音频双线电话回路的干扰影响只考虑输电线路基波和谐波电压的感应影响；同理对于线—地电报回路的干扰影响应按单相接地短路故障状态计算，只考虑输电线路基波电压的感应影响；不考虑多条输电线路的合成干扰影响。

对于直流输电线路，双极中性点接地方式应作为评判对电信线路是否存在其干扰影响的主要条件。直流输电线路在单极大地回路（或单极双导线并联大地回线方式）运行方式下的干扰影响为最大，在单极金属回路（或双极金属中线方式）运行方式下的干扰影响为最小。单极回路只是在调试、试运行或当直流系统发生故障和检修时采用，不作为一种常态运行方式，可不作为评判对电信线路是否存在其干扰影响的条件，特殊情况下另行考虑。

对传输音频信号的中继线或用户线应计算干扰影响，而对传输频分复用或时分复用的电信线路不考虑干扰影响。对有金属外皮或埋设于地下的无金属外皮电信电缆，应考虑磁干扰影响，而不应考虑静电干扰影响。对双线电话回路的干扰影响有环路影响和不平衡影响，但一般情况，环路影响可忽略不计。无金属信号线对的光缆线路不考虑干扰影响。

四、双线电话回路噪声计电动势

（一）电信线路传播效应的衰减系数

为了使理论计算值更接近实际，DL/T 5033—2006《输电线路对电信线路危险和干扰影响防护设计规程》第 6.1.6 条规定：在进行干扰影响计算时，应计入电信线传播效应的衰减系数。如图 6-35 所示电信线路考虑传播效应衰减系数后的各分量噪声计电动势计算表达式为

$$\left.\begin{aligned} e_{bv} &= e'_{bv}\frac{l_X}{l_Z}\varphi \\ e_{bI} &= e'_{bI}\varphi \\ e_{rI} &= e'_{rI}\varphi \end{aligned}\right\} \tag{6-93}$$

$$\varphi=\frac{(1-e^{-\alpha_T l_T})(e^{-\alpha_T l_1}+e^{-\alpha_T l_2})}{2\alpha_T l_T} \tag{6-94}$$

$$l_Z=\frac{\text{th}\left[\alpha_A\left(l_1+\frac{l_T}{2}\right)\right]+\text{th}\left[\alpha_A\left(l_2+\frac{l_T}{2}\right)\right]}{\alpha_A} \tag{6-95}$$

式中 φ ——电信线路传播效应的衰减系数，$\varphi<1$，无量纲，是表征噪声计电压在计算长度累积过程中传播效应的衰减特征的系数；

l_X ——电信线总长度，且 $l_X=l_1+l_T+l_2$，km；

l_Z ——计入电信线传播效应后，电信线总长的等效长度，km；

l_T ——接近段电信线长度，km；

l_1 ——电信线左侧延长段长度，km；

l_2 ——电信线右侧延长段长度，km；

α_T ——双线电信线传播衰耗常数，1/km，无工程具体资料时，可按照表 6-32 选定；

α_A ——单线大地电信线传播衰耗常数，1/km，对相同条件的电信线路可取 $\alpha_A=\frac{2}{3}\alpha_T$；

e'_{bv}、e'_{bI}、e'_{rI} ——不考虑传播效应衰减时的噪声计电动势。

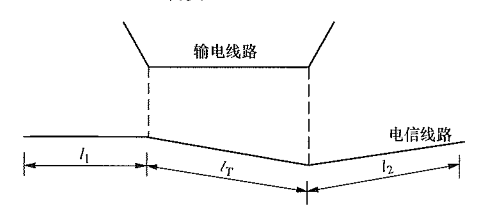


图 6-35 接近长度示意图

表 6-32 双线电信线传播衰耗常数 α_T 表 1/km

线路类型	条件	α_T	
		横担	弯钩 s_d=600mm
架空明线	4.0 线径铁线	0.0167	0.0147
	3.0 线径铁线	0.0196	0.0175
	4.0 线径铜线	0.0028	0.0021
	3.0 线径铜线	0.0042	0.0035
电缆	0.9 芯径星绞	0.067（0.02）	
	1.2 芯径星绞	0.050	
	0.5 芯径对绞	0.153	
	0.7 芯径对绞	0.096	

注 1. 括号内为长途加感电缆数据；
2. 适用于 f=800Hz，t=20℃；
3. s_d 为弯钩上电信导线间距。

式（6-94）是 φ 的通用表达式，如 l_T 为每一小段的 l_{Ti}，则计算的是 φ_i；如 l_T 为影响段电信线总长度，则计算的是 φ。应注意的是当计算 φ_i 时，则应是第 i 段首端至左端点的长度为 l_1，第 i 段末端至右端点的长度为 l_2。

（二）中性点直接接地系统交流输电线路正常运行情况下的计算

一般情况下，中性点直接接地系统的交流输电线路对音频双线电话线路的干扰影响，可利用简化公式只计算不平衡影响的噪声计电动势 e_{bv}、e_{bI} 和 e_{rI}，总噪声计电动势 e 可按式（6-96）计算

$$e=\sqrt{e_{bv}^2+e_{bI}^2+e_{rI}^2} \tag{6-96}$$

式中 e_{bv} ——由平衡电压分量和电话回路对地不平衡而引起的噪声计电动势，mV；

e_{bI} ——由平衡电流分量和电话回路对地不平衡而引起的噪声计电动势，mV；

e_{rI} ——由剩余电流分量和电话回路对地不平衡而引起的噪声计电动势，mV。

1. e_{bv} 的计算

由平衡电压分量和电话回路对地不平衡而引起的噪声计电动势

$$e_{bv}=U_{pb}g_e\eta\left|\sum\left\{\frac{n_e^I(a)l_T\varphi}{l_Z}+\frac{\left[n_e^I(a)\right]_{a_A}^{a_B}l_T\varphi}{l_Z}\right\}\right|k_e \tag{6-97}$$

$$U_{pb}=\frac{1}{\sqrt{3}}U_rK_p$$

式中 U_{pb}——输电线路电压平衡分量的等效干扰电压，V；

U_r——输电线路的额定电压，V；

K_p——输电线路电压平衡分量等效干扰电压系数，由测量确定，无测定值时，可取表 6-33 中数值；

g_e——输电线路结构系数，可参照表 6-34 选用；

η ——双线电话回路的敏感系数，mV/V，是用来表征电信线路对于干扰的敏感性，在客观上反映电信线路两导线的阻抗平衡度称为磁敏感系数，反映电信线路两导线的导纳平衡度称为电敏感系数，无实测数据时，可采用表 6-35 中数值；

l_T ——接近段内电信线路长度，km；

$n_e^I(a)$ ——平行接近段耦合系数，可按表 6-36 计算；

$\left[n_e^I(a)\right]_{a_A}^{a_B}$ ——交叉段耦合系数，可按表 6-37 计算；

φ ——计入电信线路传播效应后的衰减系数；

l_Z ——计入电信线路传播效应后的双线电话电气回路等效总长度，km；

k_e——静电屏蔽系数。

表 6-33 电压平衡分量等效干扰电压系数 K_P 表

负荷性质	输电线路额定电压（kV）	
	U_r<110	U_r≥110
主要供照明及动力负荷	0.01	0.004
主要供整流负荷	0.04	0.02

表 6-34 输电线路结构系数 g_e 表

电压等级（kV）	750	500	330	220 及以下
输电线路结构系数	1/4.25	1/4.5	1/5	1/6.5

注 目前还没有 1000kV 交流输电线路结构系数相关数据。

表 6-35 电信线路敏感系数 η 表

（f=800Hz） mV/V

线路型式	条件			敏感系数η
架空明线	铜线	横担		3
		弯钩		5
	铁线	横担		4
		弯钩		6
电缆	长途	不加感		0.6
		加感施以对地电容补偿		0.5
		加感		1
	市话	HQ	6km 及以下	1
			7km 及以上	2
		HYA		0.8

表 6-36 平行接近段耦合系数 $n_e^I(a)$ 简化公式

输电线路导线排列方式	电信线任意排列
水平排列	$-\dfrac{5.6s_p h_b h_c}{a^3}$
垂直排列	$\dfrac{2.8s_p h_c}{a^2}$
正三角排列	$\dfrac{1.8s_p h_c}{a^2}$
拱形、上字型排列	$\dfrac{2h_c}{a^2}\left(-\dfrac{2\sqrt{3}s_0 h_b}{a}+jh\right)$

注 s_p—输电线路各相导线间的几何平均距离，m，$s_p=\sqrt[3]{s_1 s_2 s_3}$，$s_1$、$s_2$、$s_3$为各相导线间的距离；

s_0—拱形、上字型排列时，中相与边相导线的水平距离，m；

h—拱形、上字型排列时，中相与边相导线的垂直距离，m；

a—输电线路与电信线路的接近距离，m，当假设电信线路在输电线路一侧为正值时，则在另一侧为负值；

h_b—输电线路导线对地平均高度，m；

h_c—电信线路导线对地平均高度，m。

表 6-37 交叉段耦合系数 $\left[n_e^I(a)\right]_{a_A}^{a_B}$ 简化公式

输电线路导线排列方式	电信线任意排列
水平排列	$-\dfrac{2.8s_p h_b h_c(a_A+a_B)}{(a_A a_B)^2}$
垂直排列	$\dfrac{2.8s_p h_c}{a_A a_B}$
正三角排列	$\dfrac{1.8s_p h_c}{a_A a_B}$
拱形、上字型排列	$\dfrac{2h_c}{a_A a_B}\left(-\dfrac{\sqrt{3}s_0 h_b(a_A+a_B)}{a_A a_B}+jh\right)$

注 符号说明同表 6-36。

2. e_{bI} 的计算

由平衡电流分量和电话回路对地不平衡而引起的噪声计电动势 e_{bI} 为

$$e_{bI}=$$

$$I_{pb}s_p\eta\left|\sum\left\{\frac{1}{a}\frac{-1380l_p}{(a^2\sigma+800)}\varphi+\frac{1.4l_p}{a_B-a_A}\varphi[z_m(x_B)-z_m(x_A)]\right\}\right|k_{800} \tag{6-98}$$

$$I_{pb}=AU_r\times10^{-6} \tag{6-99}$$

$$x=\alpha a，\quad x_A=\alpha a_A，\quad x_B=\alpha a_B$$

$$\alpha=\sqrt{\mu_0\sigma\omega}$$

式中 I_{pb}——输电线路平衡分量电流的等效干扰电流，A，由测量确定，无实测值时，可按式（6-99）计算；

l_p——接近段内输电线路长度，km；

k_{800}——800Hz 磁综合屏蔽系数，见本章第三节；

A——电流平衡分量等效干扰电流系数，可取表 6-38 所列数值；

U_r——输电线路的额定线电压，V；

$z_m(x)$——输电线路与电信线路间 800Hz 的互感阻抗，Ω/km，且 $z_m(x)=z_m(-x)$，可通过表 6-39 查取，也可通过第四节互感系数多项式计算；

σ——大地电导率，S/m，采用 800Hz 的数值；

μ_0——真空磁导率，H/m，$\mu_0=4\pi\times10^{-7}$；

ω——角频率，rad/s，$\omega=2\pi f$，$f=800\text{Hz}$。

表 6-38　电流平衡分量等效干扰电流系数 A

负荷性质	输电线路额定电压（kV）	
	U_r<110	U_r≥110
主要供照明及动力负荷	4	2
主要供整流负荷	10	5

表 6-39　$z_m(x)$ 和 $z_{mr}(x)$ 函数表（f=800Hz）　Ω/km

x	$z_m(x)=\lvert\omega M_0(x)\rvert$	$z_{mr}(x)=\int_0^x z_m(x)dx$	x	$z_m(x)=\lvert\omega M_0(x)\rvert$	$z_{mr}(x)=\int_0^x z_m(x)dx$
0	∞	0	2.8	0.275	2.754
0.001	7.565	0.0086	3.0	0.244	2.806
0.01	5.280	0.0627	3.2	0.218	2.852
0.05	3.696	0.2340	3.4	0.195	2.893
0.1	3.022	0.4000	3.6	0.175	2.930
0.2	2.359	0.6651	3.8	0.157	2.963
0.3	1.979	0.8807	4.0	0.141	2.993
0.4	1.715	1.0647	4.2	0.127	3.020
0.5	1.515	1.2258	4.4	0.115	3.044
0.6	1.355	1.3691	4.6	0.105	3.066
0.7	1.224	1.4979	4.8	0.095	3.086
0.8	1.112	1.6145	5.0	0.087	3.104
0.9	1.016	1.7208	5.5	0.070	3.143
1.0	0.933	1.8181	6.0	0.057	3.175
1.2	0.793	1.990	6.5	0.048	3.201
1.4	0.682	2.137	7.0	0.041	3.223
1.6	0.591	2.264	7.5	0.035	3.242
1.8	0.515	2.375	8.0	0.031	3.259
2.0	0.451	2.471	8.5	0.027	3.273
2.2	0.396	2.555	9.0	0.024	3.286
2.4	0.350	2.630	9.5	0.022	3.298
2.6	0.309	2.696	10	0.020	3.308

注　$z_{mr}(x)$ 为输电线路与电信线路交叉段在 800Hz 时的互感阻抗，Ω/km，且 $z_{mr}(-x)=-z_{mr}(x)$，$z_{mr}(x)$ 也可通过第四节互感系数多项式计算确定。

3. e_{rI} 的计算

由剩余电流分量和电话回路对地不平衡而引起的噪声计电动势

$$e_{rI}=I_{pr}\eta\left\{\sum\left\{z_m(x)l_p\varphi+\frac{l_p\varphi}{(x_B-x_A)}[z_{mr}(x_B)-z_{mr}(x_A)]\right\}\right\}k_{800} \tag{6-100}$$

式中　I_{pr}——输电线路电流剩余分量等效干扰电流，A，由测量确定，无实测值时，可采用表 6-40 数值；

$z_{mr}(x)$——输电线路与电信线路间 800Hz 互感阻抗，Ω/km，可由表 6-39 或 800Hz 互感系数诺模图查取，也可通过第四节互感系数多项式计算确定。

其他符号含义同式（6-97）、式（6-98）。

表 6-40　输电线路电流剩余分量等效干扰电流表　A

负荷性质	输电线路额定电压（kV）		
	110～220	330	500～750
一般负荷	0.07～0.1	0.18	0.2
主要供整流负荷	0.25～0.3	0.4	1.0

注　由于目前还没有 1000kV 特高压交流输电线路电流剩余分量等效干扰电流的实际测试数据，故在表中未列出该电压等级的剩余分量等效干扰电流数值，在计算时可参考 500～750kV 超高压交流输电线路数值。

（三）中性点不直接接地系统交流输电线路正常运行情况下的计算

中性点不直接接地系统的交流输电线路正常运行情况下，在双线电话回路中感应的噪声计电动势 e 可按式（6-101）计算

$$e=\sqrt{e_{bv}^2+e_{bI}^2} \tag{6-101}$$

式中　e_{bv}——由平衡电压分量和电话回路对地不平衡而引起的噪声计电动势，mV，其计算式同式（6-97）；

e_{bI}——由平衡电流分量和电话回路对地不平衡而引起的噪声计电动势，mV，其计算式同式（6-98）。

（四）中性点不直接接地系统交流输电线路单相接地故障情况下的计算

中性点不直接接地系统交流输电线路单相接地短路故障时，在双线电话回路中感应的噪声计电动势 e 可按式（6-102）计算

$$e=e_{rv}=U_{pr}g_r\eta\left|\sum\left[\frac{\frac{2h_bh_c}{a^2}l_T\varphi}{l}+\frac{\frac{6.3h_c}{a_B-a_A}l_T\varphi}{l}\right]\right| \tag{6-102}$$

$$U_{pr}=K_r\frac{U_r}{\sqrt{3}}$$

式中　e_{rv}——由剩余电压分量和电话回路对地不平衡而引起的噪声计电动势，mV；

g_r——输电线路结构系数，可取 $g_r=\frac{3}{11}$；

U_{pr}——输电线路电压剩余分量等效干扰电压，V；

K_r——输电线路电压剩余分量等效干扰电压系数，由测量确定，无实测值时可取 $K_r=0.02$。

（五）直流输电线路对电信线路干扰影响计算

直流架空输电线路的电压和电流不是平滑恒定的直流，而是脉动的，它会有多种谐波分量。换流器对直流系统来说是个谐波电压源，其换流阀在对交—直流的整流、逆变过程中，会产生范围在 50～5000Hz 的谐波。其中以特征谐波为主，12 脉冲的换流阀将产生基波的 12、24、36、48…次谐波。其他的非特性谐波比起特性谐波通常要小得多，但由于装设直流滤波器后，特性谐波会得到有效控制，因此，非特性谐波有时也不能忽略。这些谐波电流沿着直流线路和接地极线路向前传播，会通过感性耦合对交叉或邻近的电信线路产生干扰影响，与交流输电线路一样采用等效干扰电流的计算方法。

1. 总的等效干扰电流

对音频双线电话回路干扰影响，可利用感性耦合简化公式计算，则总噪声计电动势为

$$e=\sqrt{e_{rI}^2+e_{bI}^2} \tag{6-103}$$

式中　e——由等效干扰电流通过感性耦合在音频双线电话回路上产生的总噪声计电动势，mV；

e_{rI}——由于大地回路的谐波电流（电流剩余分量、地模分量）通过感性耦合在双线电话回路上产生的噪声计电动势，mV；

e_{bI}——由于导线回路的谐波电流（电流平衡分量、平模分量）通过感性耦合在双线电话回路上产生的噪声计电动势，mV。

对于 e_{bI}（直流输电线路电流平衡分量）、e_{rI}（直流输电线路电流剩余分量）及平模分量和地模分量，合并采用总的等效干扰电流概念。由式（6-103）可推导出总的等效干扰电流 I_{eq} 与剩余等效干扰电流 I_{dqr} 和平衡等效干扰电流 I_{dqb} 的关系为

$$I_{eq}=\sqrt{I_{dqr}^2+\left(\frac{Z_{mb}}{Z_{mr}}\right)^2I_{dqb}^2} \tag{6-104}$$

式中　I_{eq}——总的等效干扰电流，mA；

I_{dqr}——直流输电线路以大地回路谐波电流（电流剩余分量、地模分量）的等效干扰电流，mA；

I_{dqb}——直流输电线路以导线为回路谐波电流（电流平衡分量、平模分量）的等效干扰电流，mA；

Z_{mr}——直流输电线路以大地回路与电信线路 800Hz 的感性耦合阻抗，Ω/km；

Z_{mb}——直流输电线路以导线回路与电信线路 800Hz 的感性耦合阻抗，Ω/km。

当直流输电线路和电话线路的间距保持一定距离时，$\frac{Z_{mb}}{Z_{mr}}<0.05$。也就是说，通常情况下直流输电线路的平衡等效干扰电流可以忽略，总的等效干扰电流 I_{eq} 约等于通过大地返回的剩余等效干扰电流 I_{dqr}。

2. 等效干扰电流的特性

根据 GB 50789—2012《±800kV 直流换流站设计规范》附录 B 内容，直流线路等效干扰电流具有如下特性：

$$I_{eq}(x)=\sqrt{I_e(x)_r^2+I_e(x)_i^2} \tag{6-105}$$

$$I_e(x)=\sqrt{\sum_{i=1}^{m_z}\left[I(i,x)\times\frac{P_f}{1000}\times H_f\right]^2} \tag{6-106}$$

式中　$I_{eq}(x)$——沿输电线路任意坐标 x 位置上，噪

声加权至 800Hz 的等效干扰电流，mA，为两端换流站干扰电流的几何和；

$I_e(x)_r$ ——由整流站换流器谐波电压源产生的在坐标 x 处等效干扰电流分量幅值，mA；

$I_e(x)_i$ ——由逆变站换流器谐波电压源产生的在坐标 x 处等效干扰电流分量幅值，mA；

x ——沿输电线路的相对位置；

$I(i,x)$ ——沿输电线路在坐标 i 处的 n 次谐波残余电流的均方根值；

P_f ——某频率噪声加权系数，见表 6-29；

i ——谐波次数；

m_z ——计算中所考虑的最高谐波次数，通常为 50；

H_f ——耦合系数，表示典型明线耦合阻抗与频率的关系，见表 6-41。

表 6-41　直流输电线路与典型明线网络耦合系数 H_f 表

频率（Hz）	耦合系数 H_f	频率（Hz）	耦合系数 H_f
50～500	0.70	1650	1.64
550	0.75	1700	1.68
600	0.80	1750	1.71
650	0.85	1800	1.75
700	0.90	1850	1.78
750	0.95	1900	1.82
800	1.00	1950	1.85
850	1.04	2000	1.88
900	1.08	2050	1.92
950	1.11	2100	1.95
1000	1.15	2150	1.98
1050	1.19	2200	2.02
1100	1.23	2250	2.05
1150	1.26	2300	2.08
1200	1.30	2350	2.12
1250	1.34	2400	2.15
1300	1.38	2450	2.18
1350	1.41	2500	2.22
1400	1.45	3000	2.55
1450	1.49	3600	2.88
1500	1.53	4200	2.95
1550	1.56	4800	2.98
1600	1.60	5000	3.00

注　其他频率的 H_f 可采取线性插值方法求取。

3. 等效干扰电流的协调

在实际工程设计中，对于直流输电线路允许的等效干扰电流没有统一的标准，其取决于高压直流输电线路的设备性能、工作状态以及电信、电力部门的设计原则。等效干扰电流的大小还取决于高压直流系统的接线方式、滤波系统的配置及运行状态等。对同一直流系统而言，单极运行方式的等效干扰电流明显大于双极运行方式。

直流滤波器设计方案的变化，将直接引起直流输电线路的谐波电流分布的变化，谐波标准的确定是一个综合优化的结果。主要是使沿线电信线路自身的抗干扰能力所要求的谐波指标和在技术经济上合理时直流滤波器设计所能达到的谐波指标相协调。

我国现有直流工程中均以直流线路等效干扰电流作为直流谐波性能的衡量指标。直流线路等效干扰电流是一个中间指标，直流滤波最终的性能标准，应以不影响周围电信线路的通信质量为前提，使周围的电信线路上的干扰限制在可接受的水平。同时还应满足要使直流滤波器设计达到这一标准，不会增加过多的工程投资这一条件。即直流滤波器的成本与对电信线路防护成本之和达到最低。

目前，根据电信线路的现状，±500kV 架空直流输电线路单极运行方式的等效干扰电流约为 800～1200mA，双极运行方式的等效干扰电流约为 400～600mA。根据实测数据，某±500kV 直流输电线路等效干扰电流在单极运行时小于 950mA，双极运行时小于 450mA。

对于±800kV 及以上特高压直流输电工程的等效干扰电流限值如仍按±500kV 直流工程选取，明显过于严格，在换流站直流滤波器方面投资增加较多，对整个工程投资影响较大，需放宽等效干扰电流限值。目前已运行的某±800kV 特高压直流输电工程等效干扰电流一般在 2000～3500mA 之间。

4. 干扰影响计算

（1）直流输电线路在双极两端中性点接地方式正常运行情况下产生的干扰影响，主要由通过极导线—大地回路的谐波电流（电流剩余分量、地模分量）和通过极导线—极导线回路的谐波电流（电流平衡分量、平模分量），以感性耦合在双线电话回路上产生的两种噪声计电动势。

由大地回路的谐波电流通过感性耦合在双线电话回路上产生的噪声计电动势

$$e_{rl}=2\pi f\eta I_{dqr}\sum_{i=1}^{n}M_{mri}l_{pi}k_{800} \tag{6-107}$$

式中　f ——等效干扰电流的频率，800Hz；

η ——双线电话噪音敏感系数，可按表6-35 查取；

$M_{\mathrm{mr}i}$——800Hz 时直流输电线路以大地回路与电信线路间第 i 段互感系数，H/km；

$l_{\mathrm{p}i}$——直流输电线路与电信线路间第 i 段接近段长度，km；

k_{800}——800Hz 磁屏蔽系数。

由导线回路的谐波电流通过感性耦合在双线电话回路上产生的噪声计电动势为

$$e_{\mathrm{bl}}=2\pi f\eta I_{\mathrm{dqb}}\sum_{i=1}^{n}M_{\mathrm{mb}i}l_{\mathrm{p}i}k_{800} \tag{6-108}$$

式中 $M_{\mathrm{mb}i}$——800Hz 时直流输电线路以导线回路与电信线路间第 i 段互感系数，H/km。

当两种噪声计电动势分量间的相位关系不易确定时，总噪声计电动势用几何求和，见式（6-103）。

（2）直流输电线路在已知总的等效干扰电流 I_{eq} 情况下，对音频双线电话回路干扰影响总噪声计电动势的简化计算，可按式（6-109）计算。

$$e=2\pi f\eta I_{\mathrm{eq}}\sum_{i=1}^{n}M_{\mathrm{mr}i}l_{\mathrm{p}i}k_{800} \tag{6-109}$$

800Hz 互感系数，可按第四节的互感系数多项式计算或通过互感系数诺模图查取。

（3）直流输电线路在单极大地回路运行方式下，谐波电流通过感性耦合在双线电话回路上产生的噪声计电动势，可按式（6-107）计算。输电线路在单极金属回路运行方式下，谐波电流通过感性耦合在双线电话回路上产生的噪声计电动势，可按式（6-108）计算。

（4）计算直流输电线路对电信线路的干扰影响，关键是正确确定等效干扰电流。对于已运行的直流输电工程，等效干扰电流可通过实际测量获得；对于建设阶段的直流输电工程，等效干扰电流可采用换流站直流滤波器设计时所确定的等效干扰电流值。

五、单线电报回路干扰电流

在发送和接收装置直接连接到电报导线上且发接端通过设备接地时，单线电报回路中的干扰电流，应根据输电线路不同运行状态采用以下计算公式。

（一）中性点直接接地系统交流输电线路正常运行情况下的计算

中性点直接接地系统的交流输电线路在正常运行情况下，在线—地电报回路中感应的流过电报机的干扰电流可按式（6-110）计算，即

$$I=\sqrt{I_{\mathrm{bv}}^{2}+I_{\mathrm{bI}}^{2}+I_{\mathrm{rI}}^{2}} \tag{6-110}$$

式中 I——流过电报机的总干扰电流分量，mA；

I_{bv}——输电线路电压平衡分量感应引起的流过电报机的干扰电流分量，mA；

I_{bI}——输电线路电流平衡分量感应引起的流过电报机的干扰电流分量，mA；

I_{rI}——输电线路电流剩余分量感应引起的流过电报机的干扰电流分量，mA。

1. I_{bv} 的计算

输电线路电压平衡分量感应引起的流过电报机的干扰电流分量 I_{bv} 为

$$I_{\mathrm{bv}}=\frac{P_1}{m_3+P_0}U_{\mathrm{r}}\left|\sum\left\{n_{\mathrm{e}}^{I}(a)l_{\mathrm{T}}+\left[n_{\mathrm{e}}^{I}(a)\right]_{a_{\mathrm{A}}}^{a_{\mathrm{B}}}l_{\mathrm{T}}\right\}\right|\times10^{-4} \tag{6-111}$$

式中 P_1——计算系数，可按表 6-42 取值；

m_3——电信线路导线接地根数（不包含计算回路）；

P_0——计算系数，可按表 6-42 取值。

$n_{\mathrm{e}}^{I}(a)$、$\left[n_{\mathrm{e}}^{I}(a)\right]_{a_{\mathrm{A}}}^{a_{\mathrm{B}}}$ 可按表 6-36 和表 6-37 计算。

表 6-42　计　算　系　数

计算参数符号	P_0	P_1	P_2
单线电报	3	2.5	4.5
单幻电报	4	5	9

2. I_{bI} 的计算

输电线路电流平衡分量感应引起的流过电报机的干扰电流分量为

$$I_{\mathrm{bI}}=\frac{I_{\mathrm{t}}s_{\mathrm{p}}I_{\mathrm{r}}}{U_{\mathrm{t}}}\left|\sum\left\{\begin{array}{l}\dfrac{1}{a}\dfrac{-1380l_{\mathrm{p}}}{(a^{2}\sigma+12800)}+\\[2mm]\dfrac{1.4l_{\mathrm{p}}}{a_{\mathrm{B}}-a_{\mathrm{A}}}\left[z_{\mathrm{m}}(x_{\mathrm{B}})-z_{\mathrm{m}}(x_{\mathrm{A}})\right]\end{array}\right\}\right|k_{50} \tag{6-112}$$

式中 I_{t}——线—地电报回路的电报机工作电流，mA，一般采用 40mA；

s_{p}——输电线路各相导线间的几何平均距离，m，$s_{\mathrm{p}}=\sqrt[3]{s_1s_2s_3}$，$s_1$、$s_2$、$s_3$ 为各相导线间的距离；

I_{r}——输电线路正常运行情况下的负荷电流（可取额定电流），A；

U_{t}——线—地电报回路工作电压，V，按实际运行条件选取，可采用 60V 或 120V；

k_{50}——50Hz 磁屏蔽系数，可按第三节屏蔽系数计算公式计算；

σ——大地电导率，S/m，采取 50Hz 的数值；

$z_{\mathrm{m}}(x)$——互感阻抗模值，Ω/km，可按第四节互感系数多项式计算。

3. I_{rI} 的计算

输电线路电流剩余分量感应引起的流过电报机的干扰电流分量 I_{rI} 为

$$I_{\mathrm{rl}}=\frac{I_{\mathrm{t}}I_0}{U_{\mathrm{t}}}\left\{\sum\left\{\begin{array}{l}z_{\mathrm{m}}(x)l_{\mathrm{P}}+\\ \dfrac{l_{\mathrm{P}}}{x_{\mathrm{B}}-x_{\mathrm{A}}}[z_{\mathrm{mr}}(x_{\mathrm{B}})-Z_{\mathrm{mr}}(x_{\mathrm{A}})]\end{array}\right\}\right\}k_{50} \tag{6-113}$$

式中　I_0——工频电流剩余分量，A，在缺乏实测数据时，对主要供照明及动力负荷者可采用额定电流的 0.5%，主要供整流负荷者可采用额定电流的 1%；

$z_{\mathrm{m}}(x)$、$z_{\mathrm{mr}}(x)$——互感阻抗模值，Ω/km，可按第四节互感系数多项式计算。

（二）中性点不直接接地系统交流输电线路正常运行情况下的计算

中性点不直接接地系统交流输电线路正常运行情况下，在线—地电报回路中感应的流过电报机的干扰电流可按式（6-114）计算

$$I=I_{\mathrm{bv}} \tag{6-114}$$

式中　I_{bv}——输电线路平衡电压分量感应产生的流过电报机的干扰电流，mA，计算式与式（6-111）相同。

（三）中性点不直接接地交流系统输电线路单相接地故障情况下的计算

中性点不直接接地系统交流输电线路单相接地短路故障情况下，由剩余分量电压感应在线—地电报回路内流过电报机的干扰电流可按式（6-115）计算

$$I=I_{\mathrm{rv}}=\frac{P_2}{m_3+P_0}U_{\mathrm{r}}\left|\sum\left(\frac{2h_{\mathrm{b}}h_{\mathrm{c}}}{a^2}l_{\mathrm{T}}+\frac{6.3h_{\mathrm{c}}}{a_{\mathrm{B}}-a_{\mathrm{A}}}l_{\mathrm{T}}\right)\right|\times10^{-4} \tag{6-115}$$

式中　P_2——计算系数，可按表 6-42 取值；

其他符号含义同表 6-36 和式（6-111）。

第六节　防　护　措　施

当输电线路对电信线路的感应影响超过允许标准时，应根据不同性质的影响和不同类型的电信线路采用相应的防护措施。

防护措施可在输电线路或电信线路方面采取，也可在输电线路和电信线路方面同时采取，应根据具体情况，通过技术经济比较和协商，采取必要的防护措施，以保证运行维护人员人身和电信设备安全，以及避免影响电信回路的正常工作。

一、危险影响防护措施

（一）在输电线路方面可采取的防护措施

（1）与电信线路保持合理间距和交叉角度；

（2）采取良导体地线；

（3）增设屏蔽线；

（4）限制单相接地短路电流，如尽可能减少变压器中性点接地总数等；

（5）缩短接地故障持续时间；

（6）降低杆塔接地装置的接地电阻值；

（7）杆塔接地装置向远离地埋电缆、地埋光缆方向敷设。

（二）在电信线路方面可采取的防护措施

（1）加装大容量放电管、维护携带保安器、电信电缆过电压保安器、幻通谐振变压器、中和变压器、防护滤波器、隔离变压器、耦合线圈等；

（2）增设专用屏蔽线；

（3）采用屏蔽电缆或高屏蔽电缆以及提高电缆屏蔽效应的措施；

（4）采用无线中继线路或光缆线路；

（5）架空电缆、架空光缆吊线间隔一定距离接地；

（6）光缆线路接头处，金属构件不作电气连通，缩短光缆线路金属构件长度，或采用无金属光缆；

（7）输电线路杆塔接地装置附近，电缆、光缆金属构件避免接地；

（8）在输电线路接地装置与地埋电缆、地埋光缆间增设消弧线。

（三）放电管保护配置计算及安装维护

为防止输电线路短路故障瞬间对电信线路的电磁危险影响，在电信线路（架空明线或电缆线路）上采用大容量放电管保护，在我国已有多年的历史。20 世纪 50 年代初开始采用 PБ-280 型钡放电管，60 年代末逐步被 R-250 型陶瓷放电管所取代，随着电真空技术的提高，80 年代研制成了 3TF-250G、3TF-350G 型三极陶瓷放电管，之后总结相关经验并形成了 GB/T 9043—2008《通信设备过电压保护用气体放电管通用技术条件》，目前常用的气体放电管型号为 R-250K、R-350K、3R-250T、3R-350T 等。过电压间隙气体放电管保护方法，国外于 1929 年就已推荐使用，许多国家都已列入本国规程，GB 6830—1986《电信线路遭受强电线路危险影响的允许值》及 DL/T 5033—2006《输电线路对电信线路危险和干扰影响防护设计规程》、DL/T 5340—2015《直流架空输电线路对电信线路危险和干扰影响防护设计技术规程》都已把放电管列为首选的保护措施。大容量放电管作为一种经济有效的防护措施，一直被广泛应用于工频感应过电压及大气过电压的防护。

1. 放电管电气性能

R-250K 型放电管是一种两极金属陶瓷放电管，管长 40mm，最大直径 11mm，外形如图 6-36 所示。

R-250K 型放电管是根据气体放电原理制成的一种过电压间隙气体放电元件，当放电管两极间开始建

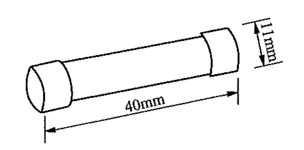


图 6-36 R-250K 型陶瓷放电管外形图

立电压时，极间形成不均匀电场，在电场作用下气体开始游离。当外加电压很快增大并达到点火电压时，气体由绝缘状态变为导电状态，放电管随之由辉光放电很快转入弧光放电。当外加电压消失后，气体很快又恢复到原来的绝缘状态。因此，采用放电管保护电信线路的工频感应过电压时，只要电信线路上感应出高于放电管的放电电压，放电管就立即放电导通接地，使电信线路上的感应电压降低至允许值，从而保证了电信线路运行维护人员和设备的安全。

国产常用四种放电管主要技术指标见表 6-43，表中同时列出了二极管和三极管国家标准通用技术条件，以资比较。

表 6-43 放电管的电气性能指标

指标名称 \ 类型型号		二极管及三极管（国家标准通用技术条件）		二极管		三极管	
		2R-250 及 3R-350		R-250K	R-350K	3R-250T	3R-350T
直流放电电压（V）	标称值	250	350	250	350	250	350
	波动范围	180～325	260～455	200～300	300～420	200～300	300～420
冲击放电电压（V）（1kV/μs）		≤800	≤1100	≤900	≤1000	≤900	≤1000
三极管两间隙放电时间差（1kV/μs）		0.2μs				0.2μs	
工频耐流能力		1.5A，1s，10 次 2.5A，1s，10 次 5A，1s，10 次 10A，1s，10 次 20A，1s，10 次 20A，1s，10 次		20A，1s，10 次	15A，1s，10 次	20A，1s，10 次	
冲击耐流能力（8/20μs）		1kA，10 次 2.5kA，10 次 5kA，10 次 10kA，10 次 10kA，10 次 20kA，10 次		20kA，10 次	10kA，10 次	10kA，10 次	
极间电容（pF）		≤10		≤3		≤5	
绝缘电阻（MΩ）		≥1000		≥1000		≥1000	

上述放电管主要应用于电信明线上，电缆线路的过电压保护主要应用 GYB 系列通信电缆保安器，它是由多个固定式放电管的组合，采用国际上流行的充气陶瓷放电管防护技术，是人身和设备免受雷害、高压输电线电磁感应危害的最有效手段。GYB 系列通信电缆保安器主要技术指标见表 6-44。

表 6-44 GYB 系列通信电缆保安器主要技术指标

指标名称	技术指标值
直流点火电压（V）	350±70 或 250±50
脉冲点火电压（V/μs）	≤1000
绝缘电阻（MΩ）	＞1000
工频耐流（A）	20A、1s、10 次
冲击耐流（kA）	10
极间电容（pF）	＜5
横向电压（V）	≤45
陶瓷板尺寸（mm）	125×52×10
机箱抗电强度（V）	＞3500（交流）
环境温度（℃）	−40～55
相对湿度	85%

2. 放电管配置计算方法

在电信线路上采用加装放电管来保护输电线路的电磁感应危险影响时，需要进行放电管的装设位置和接地电阻计算，以使电信导线上任一点的感应电压降低至允许值。以下具体介绍两种常用的配置计算方法。

（1）典型配置计算方法。

1）放电管装设位置的确定。当电信线路上仅在两端装有两处放电管时，两放电管间任意一点（对应输电线路事故点 k）的电信线路对地电压可按式（6-75）或式（6-76）计算，当该点对地电压超过电信线路危险影响允许值时，需考虑在电信线路中间加装放电管。电信线路装有多处放电管时，电信线路上与输电线路短路点相对应点处的对地电压可按式（6-78）计算。

由于放电管的接地电阻存在电压降，一般取 150V，所以实际计算时应为允许对地电压再减去放电管接地电阻上的电压降，即 $U_0=650-150=500$V。计算时只要沿着输电线路移动接地短路点，就可求得任意相邻两处放电管间电信导线的最大对地电压 $u_{0x\max}$。

配置方法可以从电信线路影响区段两端起各装一处放电管，然后验算中间任一点的对地电压，如对地电压不能满足允许值要求，继续在中间加装放电管，直至任意相邻两处放电管间的 $u_{0x\max}$ 不超过允许值 U_0 为止。也可从电信线路影响区段的某一端起装，沿着

电信线路向另一端进行，逐个验算相邻两处放电管间的 u_{0xmax}，直至装到另一端为止。确定放电管的装设位置时，还要考虑运行维护的方便、电信回线的变化和土壤电阻率好坏等情况。

2）放电管接地电阻的计算。放电管接地电阻的计算与放电管的动作条件、电信线路导线束的线束阻抗及放电管的接地电阻允许电压降有关。

a）放电管动作条件的确定。输电线路为双侧供电时，若输电线路接地短路点对应于电信线路两端放电管处，则仅考虑两端放电管动作；若接地短路点对应于某中间放电管处，则考虑该中间放电管和两端放电管动作；若接地短路点对应于某中间两处放电管之间，则考虑此中间两放电管和两端放电管动作。输电线路为单侧供电时，只考虑接地短路点对应的放电管和供电侧始端放电管动作。

实际上，当装设多处放电管时，不论接地短路点对应于何处，只要感应电压超过放电管的放电电压，任一处放电管都有动作的可能。因此，上述放电管动作条件的假设是偏于安全的。

b）放电管接地电阻允许电压确定。放电管接地电阻允许电压降应根据配置后的 u_{0xmax} 值来计算，此时放电管接地电阻允许电压降应为

$$U_m \leqslant 2(U_e - u_{0xmax}) < U_e \tag{6-116}$$

式中 U_m——某放电管接地电阻允许电压降，V；

U_e——电信线路导线上对地电压允许值，V；

u_{0xmax}——电信线路导线上计算的最大对地电压值，V。

放电管接地电阻允许电压降计算值仍不得超过任何一点对大地电压的规定值 U_e。当电信线路上只装设两处放电管或当输电线路单侧供电时，则取 $U_m = U_e$。考虑放电管接地装置上的接地电阻压降后，实际线路上的对地电压允许值为 500V。《防止和解决电力线路对通信信号线路危险和干扰影响的原则协议》第 41 条规定，在特殊情况下（即进局、进电缆等）应降低最高电压的允许值，此时可采取 250V。考虑到目前通信设施的实际情况，在终端局、架空明线进电缆处，允许电压降可取 350V。

c）终端放电管接地电阻计算。终端放电管接地电阻计算，首先考虑输电线路接地短路点对应于两端放电管处的情况，且该接地短路点是在使纵电动势较大的那一侧。此时首、末端放电管接地电阻 R_b、R_c 为

$$\left.\begin{aligned} R_b &= \frac{U_b Z_n l_T}{E - U_b - U_e} \\ R_e &= \frac{U_e Z_n l_T}{E - U_b - U_e} \end{aligned}\right\} \tag{6-117}$$

式中 E——保护区段感应纵电动势，V；

U_b、U_e——首、末端放电管接地电阻允许电压降，V，一般在线杆上可取 500V，在终端局、架空明线进电缆处可取 350V；

l_T——保护区段通信线路长度，km；

Z_n——电信线路线束阻抗，Ω/km，可从图 6-38～图 6-41 中查取。

然后依次计算输电线路接地短路点对应于各中间放电管（见图 6-37）处的情况时首、末端放电管接地电阻为

$$\left.\begin{aligned} R_b &= \frac{U_b Z_n l_{T1}}{E_1 - U_m - U_b} \\ R_e &= \frac{U_e Z_n l_{T2}}{E_2 - U_m - U_e} \end{aligned}\right\} \tag{6-118}$$

式中 l_{T1}、l_{T2}——首、末端放电管至接地短路点对应的某中间放电管的距离，km；

E_1、E_2——l_{T1}、l_{T2} 两区段电信线路上感应的纵电动势，V；

U_m——中间某放电管接地电阻允许电压降，V，一般可取 500V。

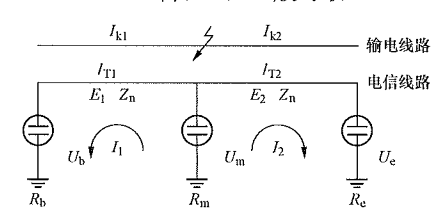


图 6-37 放电管计算示意图

由式（6-117）、式（6-118）计算得到的 R_b 和 R_e，取其小的 R_{bmin}、R_{emin} 为设计值。输电线路为单侧供电时，类似地从一个方向依次计算输电线路接地短路点对应于各中间放电管处的情况，取其小者为首端放电管接地电阻设计值。

在计算过程中，如果计算出电阻为负值，说明此短路点对接地电阻没有要求，可取任意值，不是选择接地电阻的控制条件。

d）中间放电管接地电阻计算。中间放电管接地电阻计算，只需考虑输电线路接地短路点对应于中间任一放电管处的情况，此时该中间放电管接地电阻值为

$$R_m = \frac{U_m}{\dfrac{E_1 - U_m}{R_{bmin} + Z_n l_{T1}} + \dfrac{E_2 - U_m}{R_{emin} + Z_n l_{T2}}} \tag{6-119}$$

式中 R_{bmin}、R_{emin}——首、末端放电管接地电阻设计值，Ω。

计算过程中如果 $E_1 - U_m$ 为负值时，可以和后一项用代数和相加，以求得 R_m；在 $E_2 - U_m$ 为负值时，可同样处理。当计算电阻值为负值时，说明此短路点对接地电阻没有要求，可是任意值。

e）电信线路线束阻抗确定。电信线路线束阻抗的精确计算很复杂，在工程设计中一般均由图 6-38～图 6-40 查取。图中铁线负载电流只取到 7A，因电流再增大其阻抗基本不变；由于导线在杆面中的位置及大地电导率对线束阻抗的影响很小，所以线束阻抗计算曲线可应用于任意情况的电信明线。

图 6-38（a）中，铁线中电流为 1A 时，一条导线的阻抗按下式计算：

$$Z_{co}=Z_n(n_{co}+0.113n_F);\quad Z_F=Z_n(n_F+8.85n_{co}) \tag{6-120}$$

图 6-39（b）中，铁线中电流为 3A 时，一条导线的阻抗按下式计算：

$$Z_{co}=Z_n(n_{co}+0.086n_F);\quad Z_F=Z_n(n_F+11.6n_{co}) \tag{6-121}$$

图 6-39（c）中，铁线中电流为 5A 时，一条导线的阻抗按下式计算：

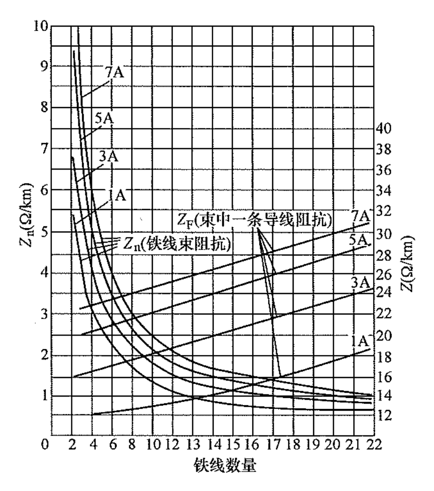


图 6-38 铁线中电流为 1、3、5、7A 时铁线束及束中一条导线阻抗曲线

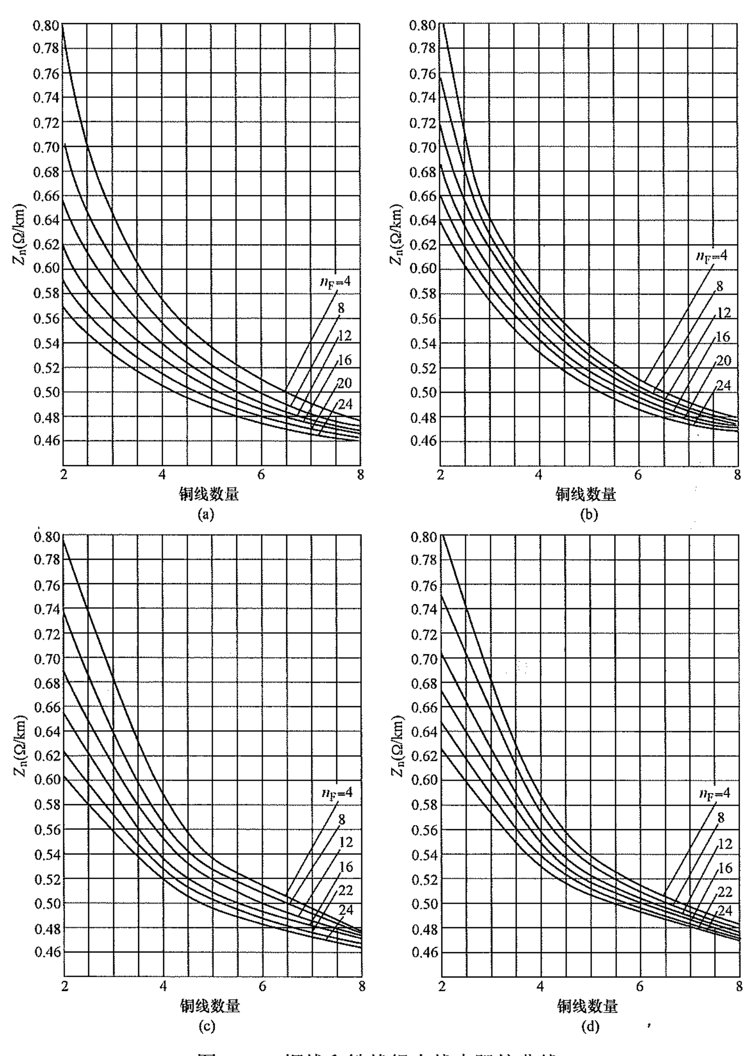


图 6-39 铜线和铁线组合线束阻抗曲线

$$Z_{co}=Z_n(n_{co}+0.069n_F);\ Z_F=Z_n(n_F+14.5n_{co}) \tag{6-122}$$

图 6-39（d）中，铁线中电流为 7A 时，一条导线的阻抗按下式计算：

$$Z_{co}=Z_n(n_{co}+0.0615n_F);\ Z_F=Z_n(n_F+16.3n_{co}) \tag{6-123}$$

式中 Z_n——线束阻抗，Ω/km；

Z_{co}——线束中一条铜线的阻抗，Ω/km；

Z_F——线束中一条铁线的阻抗，Ω/km；

n_{co}——线束中铜线数目；

n_F——线束中铁线数目。

图 6-40（a）中，铁线中电流为 1A 时，一条导线的阻抗按下式计算：

$$Z_{al}=Z_n[n_{al}+(0.167+j0.0073)n_F]$$
$$Z_F=Z_n[n_F+(5.98+j0.262)n_{al}] \tag{6-124}$$

图 6-40（b）中，铁线中电流为 3A 时，一条导线的阻抗按下式计算：

$$Z_{al}=Z_n[n_{al}+(0.116+j0.044)n_F]$$
$$Z_F=Z_n[n_F+(7.53+j2.89)n_{al}] \tag{6-125}$$

图 6-40（c）中，铁线中电流为 5A 时，一条导线的阻抗按下式求出：

$$Z_{al}=Z_n[n_{al}+(0.087+j0.047)n_F]$$
$$Z_F=Z_n[n_F+(8.89+j4.8)n_{al}] \tag{6-126}$$

图 6-40（d）中，铁线中电流为 7A 时，一条导线的阻抗按下式计算：

$$Z_{al}=Z_n[n_{al}+(0.074+j0.048)n_F]$$
$$Z_F=Z_n[n_F+(9.76+j6.07)n_{al}] \tag{6-127}$$

式中 Z_{al}——线束中一条铝线的阻抗，Ω/km；

n_{al}——线束中铝线数目。

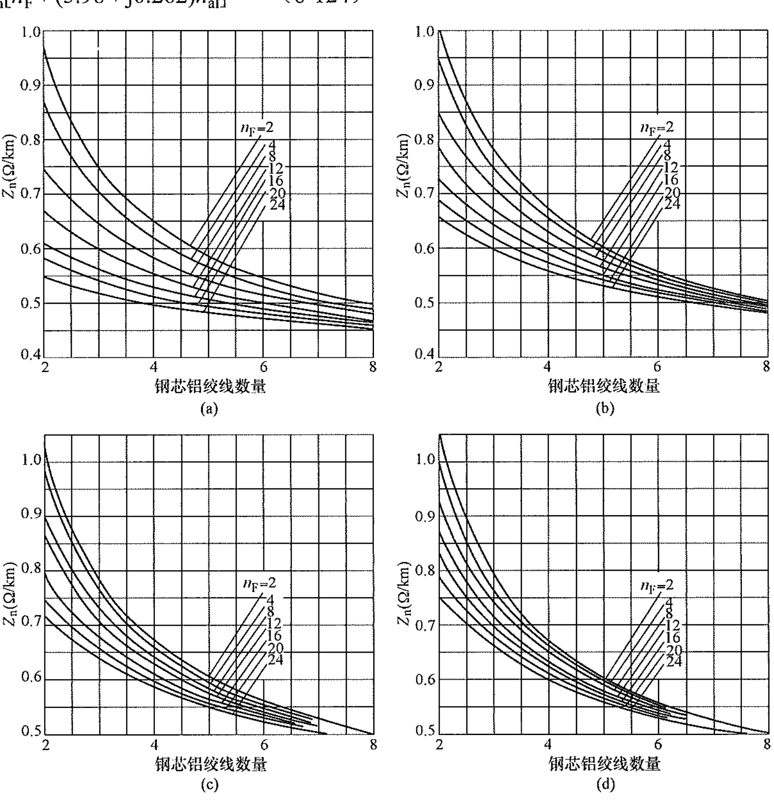


图 6-40 钢芯铝线和铁线组合线束阻抗曲线

（2）简化配置计算方法。典型配置计算方法较为繁杂，可以使用计算机进行计算。如前所述，放电管实际装设位置还要受到其他条件的限制，而且放电管动作条件的假设也偏于安全。因此，简化配置计算方法也是经常采用的。

简化配置原理是把保护区段内各斜接近段等效成完全平行接近段，因而可用平均互感阻抗 $\overline{\omega M}$ 来表征，即

$$\overline{\omega M}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\omega M_i l_{pi}}{\sum_{i=1}^{n}l_{pi}} \tag{6-128}$$

式中 $\omega M_i l_{pi}$——第 i 接近段互感阻抗，Ω/km；

l_{pi}——第 i 接近段接近长度，km。

再把保护区段内相邻两处放电管间短距离内的接地短路总电流的变化看成是线性的，因而可用平均接

地短路总电流 $\overline{I_s}$ 来表征。如果保护区段内存在非故障输电线路的影响，由于放电管配置计算中非故障输电线路综合影响的效果在平行接近条件时是均衡的，在非平行接近条件时主要改变放电管间电信导线对地电压的分布，故在放电管配置计算时，非故障输电线路的影响一般也可以不考虑。这样保护区段长度 l_T 内所需的放电管总处数为

$$N=\frac{\overline{\omega M I_s l_T}}{4u_{0xmax}}+1 \tag{6-129}$$

一般假定放电管接地装置上压降为150V，则可取电信线路的对地电压 $u_{0xmax}=650V-150V=500V$，故

$$N=\frac{\overline{\omega M I_s l_T}}{2000}+1 \tag{6-130}$$

各相邻放电管间的平均互感阻抗为

$$\overline{Z}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\omega M_i l_{pi}}{N-1} \tag{6-131}$$

两端放电管接地电阻的最小值，一般是在对应于两端放电管处输电线路发生接地短路且在使纵电动势为较大的那一端出现，两端放电管的装设位置位于进局附近的可能性又较大，偏于安全可取 $U_b=U_e=350V$，故两端放电管接地电阻为

$$R_b=R_e=\frac{350Z_n l_T}{E-700} \tag{6-132}$$

中间放电管接地电阻可仍按式(6-119)计算确定，此时 U_m 均取450V。也可采用经验平均值见表6-45，由保护区段最大感应纵电动势和电信线路线束阻抗，即可查得各中间放电管接地电阻的经验平均值。

简化计算方法的说明：

1）保护区段长度内所需的放电管总处数 N 按计算结果取整；

2）中间放电管按各相邻放电管间平均互感阻抗等分配置，同时要结合放电管运行维护条件、电信线路回线变化及土壤电阻率好坏等情况加以适当调整；

3）输电线路单相接地短路总电流，按保护计算区段的中点查取，即取 $\overline{I_s}$；

4）合理选定保护区段是使用简化配置计算的关键环节，通常两端放电管必须控制在有效影响段落的两端，对于某些接近距离变化过大或存在中间变电站等情况，简化配置计算可分段进行，以使其接近平行段条件。

表 6-45 中间放电管接地电阻的经验平均值

R_m (Ω) \ E (V) $Z_n l$ (Ω)	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	
5 以下	7	3					2Ω 以下仍按式 $R_m=\frac{450}{\frac{E_1-450}{R_{bmin}+Z_n l_{T1}}+\frac{E_2-450}{R_{emin}+Z_n l_{T2}}}$ 计算取值					
5～7	9	4	2									
7～10	13	5	3	2								
10～14	18	7	4	3	2							
14～20	25	9	5	4	3	2						
20～30	35	13	7	5	4	3	2					
30～45	60	18	13	7	5	4	3	2				
45～65		35	18	9	7	5	4	3	2			
65～100		60	25	18	13	9	7	5	3	2		
100～140			35	25	18	13	9	7	5	4	3	
140～200			60	35	35	25	18	13	9	7	5	4
200 以上				60	60	35	35	25	18	13	9	7

（3）放电器安装数量要求。

在架空电信明线上安装放电器的总数：对于载波回路，每增音段内的电信线路不应超过15处；对于音频回路不应超过25处。在特殊情况下，根据有关部门的协议，可增加放电器数量。

对绝缘强度高又不带避雷器的市话电缆，宜在线路局端、用户端及分线箱（盒）、配线箱等处加装电缆保安器。

3. 放电管安装与维护

R-250K型放电管安装在专用的瓷绝缘子内，如

图 6-41 所示，绝缘子有可启拧的上盖，下部固定可与大号直、弯螺脚配套，安装与维护都很方便。

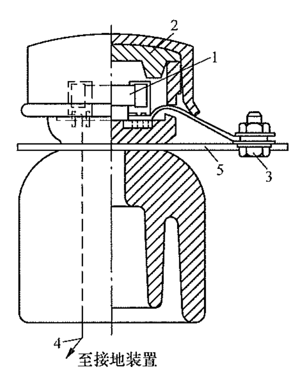


图 6-41 放电管专用瓷绝缘子示意图

1—R-250K 型放电管；2—橡胶垫盖；3—引接线夹；4—接地引下线；5—电信导线

R-250K 型放电管的电气接线见图 6-42，放电管的一个电极接至电信导线，另一个电极接地。放电管的引下线要求采用绝缘线，其在杆上部分的长度不小于 2.5m，以防止上杆作业时人体部分同时接触电信导线和接地引下线。

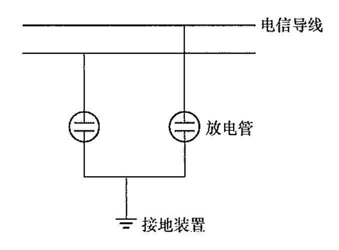


图 6-42 R-250K 型放电管电气接线图

GYB 系列通信电缆保安器产品分为 10～50 对、100～2400 对等 20 余个规格、型号，分为柜式或站台箱式两种，柜式一般用于户内，箱式一般用于户外。箱式产品为密封分线箱，防水、防尘。陶瓷板架可水平翻转，便于拆装、配线，维护量小。全部采用三极陶瓷放电管，大大减少了设备体积、质量，可直接固定在普通木质、水泥电杆上或墙壁上，也可落地及室内安装。各种规格型号的 GYB 系列通信电缆保安器外形尺寸及质量见表 6-46。保安器安装原理及放电管接线见图 6-43，保安器杆上安装见图 6-44。

表 6-46 GYB 系列通信电缆保安器外形尺寸及质量表

规格型号	样式	外形尺寸 长×宽×高（mm×mm×mm）	质量（kg）	适用电缆芯线对数
GYB-10	铝合金箱式	200×115×305	4	10
GYB-20	铝合金箱式	200×145×430	5.5	20
GYB-30	铝合金箱式	200×145×430	6.5	30
GYB-50	铝合金箱式	200×145×630	9	50
GYB-100	普通箱式	366×145×630	19	100
GYB-200	站台箱式	580×280×860	40	200
GYB-300	站台箱式	580×280×1250	56	300
GYB-400	站台箱式	680×280×1240	70	400
GYB-600	站台箱式	580×380×1250	110	600
GYB-200	站台箱式	720×280×860	50	200
GYB-300	站台箱式	720×280×1250	61	300
GYB-400	站台箱式	830×280×1250	80	400
GYB-600	站台箱式	720×380×1250	120	600
GYB-500	柜式（户内）	600×400×1600	100	500
GYB-1000	柜式（户内）	800×550×1800	200	1000
GYB-1200	柜式（户内）	800×550×1950	210	1200
GYB-2000	柜式（户内）	1000×550×1950	400	2000
GYB-800	站台箱式	740×550×1300	160	800
GYB-1000	站台箱式	740×500×1560	200	1000
GYB-1200	站台箱式	910×500×1560	220	1200
GYB-2400	站台箱式	1350×500×1800	400	2400

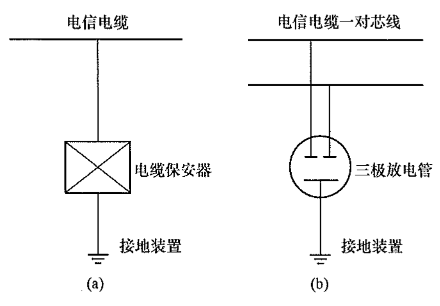


图 6-43 保安器安装原理图及放电管接线图

（a）保安器安装原理图；（b）放电管电气接线图

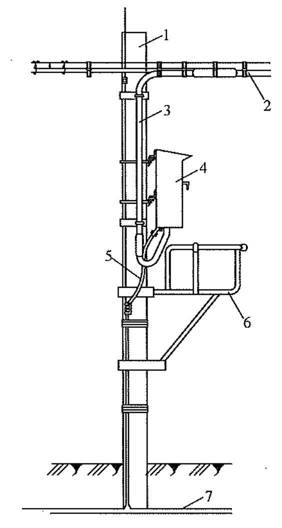


图 6-44 GYB 电缆保安器杆上安装示意图

1—电线杆；2—电信电缆；3—尾巴电缆；4—电缆保安器；5—接地引下线；6—分线箱站台；7—接地装置

放电管在安装前要进行放电电压测试，满足要求方能使用。放电管安装后的维护，一般在每年雷雨季节前后各进行一次全面检测，可采用携带型放电管放电电压测试仪在现场检测，如放电管备品数量充裕，也可采用在现场全部更换的办法，将换下来的放电管带回室内进行检测，满足要求的留在下次使用。放电管日常维护可结合巡线工作进行：对外部涂漆有否烧黑或变色、接触是否良好等做外观检查，对个别有怀疑的管子可随时进行检测与更换。放电管接地装置的接地电阻一般每年测试一次，并做好测试记录。

（四）其他保护设备简介

1. 音响冲击限制器

由于输电线路电磁感应影响，在电话回路中可能产生音响冲击危险的情况有两种：一种是由于电感应影响在电话回路内产生大于 20MJ 的电能，另一种是由于磁感应影响，双线电话回路装设的两个放电管可能不同时动作，使放电电流通过电话机，产生很大的喀啦声。此外，由于雷电感应也会产生音响冲击危险，故规定头戴型受话器都应装设音响冲击限制器。音响冲击限制器组装见图 6-45，装设位置在交换台内头戴型受话器的塞孔前，目前有的交换台在出厂前已备有音响冲击限制器。

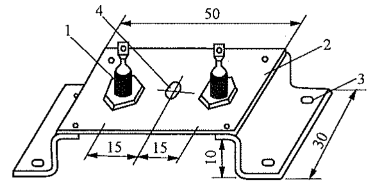


图 6-45 音响冲击限制器组装图（mm）

1—硅二极管；2—薄胶木板；3—薄铁片支架；4—引线孔

音响冲击限制器的电气接线见图 6-46，正反相接的两个二极管与头戴型受话器并联。其特性是：在端电压低于 0.5V（头戴耳机的最高工作电压）时，800Hz 阻抗远较头戴型受话器为大，正常工作衰耗很小；而在端电压超过 1.2V 时，50Hz 阻抗远较头戴型受话器为小，对音响冲击起到分流和保护作用。

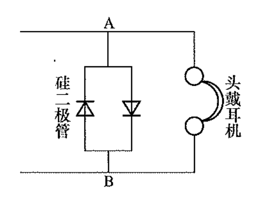


图 6-46 音响冲击限制器电气接线图

2. 排流线圈

排流线圈也称耦合线圈，在防护输电线路感应影响方面主要是用来配合放电管使用，其电气接线见图 6-47。放电管串接排流线圈具有两个作用：

（1）能促使双线电话回路装设的两个放电管同时动作，当其中一个放电管先动作时，放电电流流经排流线圈中的一个线圈，同时在未动作放电管的一个线圈上感应产生与输电线路感应电压具有相同符号的电动势，增加了未动作放电管上所加的电压，从而促使双线电话回路的两个放电管同时动作。

（2）由于流入排流线圈中的两个线圈的信号电流（话音电流、电报电流、铃流）的方向相反，故当放电管动作时排流线圈呈现很高的阻抗，进一步避免了对话音、振铃和电报的动态影响。

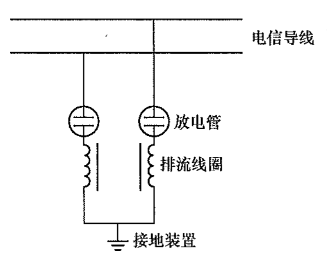


图 6-47 排流线圈配合放电管使用电气接线图

排流线圈由两个相同的绕组组成，同绕在由钼坡莫合金制成的环形铁芯上。排流线圈的主要特性如下：

1）每个线圈的电阻为2Ω，电感为160mH；

2）两个线圈的平衡度大于60dB；

3）耐受雷电流的能力，每线圈通过600A电流（电流波形为4/63μs），连续放电20次，其原有技术特性无变化；

4）耐受工频电流的能力，每线圈通过15A电流，经过3.2s，温度不高于20℃，其原有技术特性无变化。

3. 维护携带保安器

维护携带保安器即携带型放电器，是固定式放电器、放电器检测器和维护电话的结合，因而该设备具有保安、通话、检测三种功能。它有体积小、质量轻，操作简单、使用方便、读数准确（可检测放电器的标称电压）等优点。它是维护人员登杆作业时才使用的保安设备，有多线多管和多线单管两种系列。

4. 中和变压器

中和变压器系无源设备，工作可靠，体积小，安装简便、成本低。与输电线路接近的电信线路，线对不多，且主要是磁危险影响超过允许值时，在电信线路上安装中和变压器，对降低感应纵电动势可起到显著效果，对杂音干扰也有一定的抑制作用。中和变压器有1:1的一个一次绕组和两个二次绕组，一次绕组串入与电信线路同杆架设的领示线中，二次绕组串入电信回路两根导线中。

5. 幻通谐振变压器

幻通谐振变压器的防护原理与中和变压器相似，是中和变压器等若干措施的结合和改进。它由终端和中间多绕组变压器配套组成。在被防护的线路中取一对回线作为原边回线，通过两终端变压器一次绕组上并接的横向支路，构成50Hz的幻—地谐振回路作领示线，一次回线仍能照常通话、开通直流幻报，对传输铃流和直流测试均不受影响。是一种对电信明线和电缆都可适用的简单、经济、有效的防护设备，可将感应纵电动势和杂音干扰电压降至原有值的$\frac{1}{10}$左右。

6. 隔离变压器

隔离变压器将电信线路分隔成数段，使每段的最大感应纵电动势低于允许值，安装的数量可根据电信线路受影响程度及该回路所允许接入衰耗值决定。

二、干扰影响防护措施

（一）在输电线路方面可采取的防护措施

（1）与电信线路保持合理的间距和交叉角度；

（2）采用良导体地线；

（3）增设屏蔽线。

（二）在电信线路方面可采取的防护措施

（1）改迁电信线路路径；

（2）改明线为电缆或光缆；

（3）改有线通信为无线通信；

（4）增设屏蔽线；

（5）线—地电报改载波电报；

（6）在电信回路上装设中和变压器或幻通谐振变压器。

第七节　接　地　装　置

在放电管配置计算中，为限制输电线路对电信线路的瞬时感应过电压，要在通信线路上安装一定数量的放电管。其接地电阻值要达到设计要求，才能保证电信设备和维护使用人员的安全。另外，各种屏蔽体的接地装置电阻只有满足设计值时，才能起到应有的屏蔽效果。通信保护设计中的各种接地，都要提出接地装置施工图。

一、土壤电阻率

接地装置的接地电阻是由接地体与一定范围内的大地所构成，前者电阻远小于后者，所以接地装置的电阻主要决定于土壤的电阻率。土壤性质的好坏，直接影响到接地装置的性能。对安装接地装置地点的土壤电阻率，最好进行实测，如无实测数值时，可参考表3-88所列数值。

土壤电阻率在一年中是随季节变化的，故土壤电阻率实测值应考虑季节系数（参见表3-89）。

二、放电管的接地装置

放电管的接地装置，通常采用管形接地体和水平接地体组成的复合接地体（简称管带接地体，钢管为垂直接地体，铁带为水平接地体）；当土质含有大量卵石或为岩石，采用管形接地体施工有困难时，可减少管形接地体数量、缩短管子长度或全部采用水平接地体。

不同型式的管带接地体和水平接地体的典型装置见表6-47、表6-48。参考GB 50689—2011《通信局（站）防雷与接地工程设计规范》，管形接地体选用管径48mm、壁厚3.5mm、长2.0m的镀锌铁管，管子间距为5m，垂直于地面布置。水平接地体选用40mm×4mm镀锌扁铁，也可选用直径不小于10mm的镀锌圆钢代替。接地体连接采用焊接方式，并应进行防腐处理；接地体的焊接长度，采用扁钢时不应小于其宽度的2倍，采用圆钢时不应小于其直径的10倍。接地体埋深一般不小于0.7m，在土壤较薄的石山或碎石多岩地区应根据具体情况确定接地体的埋深。

表 6-47　　　　管带接地装置典型图表

接地型式	每根射线长度（m）	每根射线上的管数（根）	射线总长度（m）	总管数（根）	接地电阻计算值（Ω）当电阻率（Ω·m）分别为以下值时										土（石）方量（m³）
					100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
甲型		乙型（120°）		丙型		丁型			戊型（>60°）			己型（60°）			
甲 1	10	1	20	2	5.95	11.9	17.9	23.8	29.7	35.7	41.8	47.5	53.5	59.5	8.45
甲 2	15	2	30	4	3.85	7.6	11.55	15.4	19.3	23.1	27.0	30.7	34.6	38.5	12.9
甲 3	20	3	40	6	2.83	5.66	8.5	11.3	14.2	17.0	19.9	22.6	25.4	28.4	17.34
甲 4	25	4	50	8	2.34	4.67	7.02	9.35	11.3	14.6	16.4	18.7	21.0	23.4	21.8
甲 5	30	5	60	10	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	26.26
乙 1	15	2	45	6	3.3	6.6	9.92	13.2	16.5	19.8	25.1	26.3	29.7	33.0	18.92
乙 2	20	3	60	9	2.27	4.53	6.8	9.08	11.35	13.6	15.9	18.2	20.4	22.7	25.2
乙 3	25	4	75	12	1.81	3.62	5.43	7.24	9.05	10.85	12.7	14.5	16.3	18.1	32.7
乙 4	30	5	90	15	1.42	2.84	4.26	5.68	7.1	8.51	10.0	11.35	12.8	14.2	39.4
乙 5	35	6	105	18	1.22	2.44	3.65	4.87	6.08	7.31	8.51	9.74	11.0	12.2	46.1
丙 1	20	3	80	12	2.13	4.26	6.38	8.51	10.6	12.75	14.9	17.0	19.1	21.3	34.7
丙 2	25	4	100	16	1.46	2.92	4.38	5.83	7.2	8.75	10.2	11.65	13.1	14.6	43.6
丙 3	30	5	120	20	1.22	2.44	3.64	4.87	6.08	7.31	8.5	9.74	11.0	12.2	52.5
丙 4	35	6	140	24	1.04	2.08	3.13	4.42	5.21	6.62	7.3	8.82	9.36	10.4	69.4
丁 1	30	5	180	30	0.81	1.62	2.43	3.24	4.05	4.86	5.7	6.46	7.28	8.1	78.8
丁 2	35	6	200	36	0.7	1.4	2.1	2.8	3.47	4.2	4.86	5.6	6.3	6.93	92.1
丁 3	40	7	240	42	0.6	1.2	1.8	2.4	3.0	3.6	4.2	4.8	5.4	6.0	105.5
丁 4	45	8	270	48	0.54	1.04	1.63	2.16	2.71	3.24	3.79	4.32	4.88	5.41	119.0
戊 1	35	6	280	48	0.56	1.12	1.69	2.22	2.81	3.36	3.93	4.47	5.04	5.62	123.0
戊 2	40	7	320	56	0.49	0.98	1.46	1.96	2.42	2.94	3.39	3.91	4.41	4.85	140.0
戊 3	45	8	360	64	0.44	0.88	1.31	1.76	2.15	2.64	3.08	3.51	3.95	4.37	158.4
戊 4	50	9	400	72	0.43	0.86	1.3	1.72	2.16	2.57	3.0	3.43	3.87	4.32	176.0
戊 5	55	10	440	80	0.39	0.78	1.17	1.56	1.94	2.34	2.72	3.12	3.51	3.89	194.0
戊 6	60	11	480	82	0.36	0.72	1.08	1.44	1.8	2.16	2.52	2.88	3.24	3.6	212.0
己 1	40	7	400	70	0.5	1.0	1.51	2.0	2.52	3.0	3.53	4.0	4.5	5.04	176.0
己 2	45	8	450	80	0.455	0.91	1.37	1.78	2.27	2.73	3.18	3.54	4.1	4.55	198.0
己 3	50	9	500	90	0.416	0.83	1.25	1.66	2.07	2.49	2.9	3.32	3.73	4.15	220.0

（图中各型标注：接地线引入点）

表 6-48　　　　多方延伸带状接地装置典型图表

接地型式	每根射线长度（m）	射线总长度（m）	接地装置型式	接地电阻计算值（Ω）当电阻率（Ω·m）分别为以下值时										土（石）方量（m³）
				100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
甲 1	10	20	甲型（接地线引入点）	8.13	16.3	24.4	32.5	40.7	48.8	57.0	65.1	73.2	81.4	8.0
甲 2	15	30		5.85	11.7	17.8	23.4	29.3	35.2	41.0	48.7	52.7	58.6	12.0
甲 3	20	40		4.62	9.23	13.9	18.5	23.1	27.8	32.4	37.0	41.6	46.3	16.0
甲 4	25	50		3.89	7.68	11.5	15.4	19.2	23.0	26.9	30.7	34.6	38.4	20.0
甲 5	30	60		3.29	6.58	9.89	13.2	16.5	19.8	23.1	26.4	30.0	33.0	24.0
甲 6	35	70		2.89	5.79	8.68	11.6	14.5	17.4	20.3	23.2	26.0	29.0	28.0
甲 7	40	80		2.58	5.17	7.76	10.4	12.9	15.5	18.1	20.7	23.3	25.9	32.0
甲 8	45	90		2.34	4.69	7.0	9.37	11.7	14.1	16.4	18.7	21.1	23.4	36.0

续表

接地型式	每根射线长度（m）	射线总长度（m）	接地装置型式	接地电阻计算值（Ω）										土（石）方量（m³）
				当电阻率（Ω·m）分别为以下值时										
				100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
乙1	10	30	乙型（120°，接地线引入点）	6.31	12.6	18.9	25.2	31.5	37.9	44.1	50.4	56.8	63.1	12.0
乙2	15	45		4.5	9.0	13.5	18.0	22.5	27.0	31.5	36.0	40.4	45.0	18.0
乙3	20	60		3.52	7.05	10.6	14.1	17.6	21.1	24.7	28.2	31.7	35.2	24.0
乙4	25	75		2.91	5.82	8.74	11.7	14.6	17.5	20.4	23.3	26.2	29.1	30.0
乙5	30	90		2.49	4.98	7.47	9.96	12.5	14.9	17.4	19.9	22.4	24.9	36.0
乙6	35	105		2.18	4.37	6.55	8.73	10.9	13.1	15.3	17.5	19.7	21.8	42.0
乙7	40	120		1.94	3.89	5.83	7.78	9.7	11.7	13.6	15.6	17.5	19.5	48.0
乙8	45	135		1.76	3.51	5.27	7.0	8.8	10.5	12.3	14.1	15.8	17.6	54.0
丙1	10	40	丙型（接地线引入点）	5.46	10.9	16.4	21.9	27.3	32.8	38.2	43.7	49.2	54.6	16.0
丙2	15	60		3.86	7.72	11.6	15.4	19.3	23.2	27.0	30.9	34.7	38.6	24.0
丙3	20	80		3.01	6.02	9.0	12.0	15.0	18.1	21.1	24.1	27.1	30.1	32.0
丙4	25	100		2.48	4.95	7.43	9.91	12.4	14.9	17.3	19.8	22.3	24.8	40.0
丙5	30	120		2.11	4.22	6.34	8.45	10.6	12.7	14.8	16.9	19.0	21.0	48.0
丙6	35	140		1.84	3.7	5.54	7.39	9.2	11.1	12.9	14.8	16.6	18.5	56.0
丙7	40	160		1.64	3.28	4.92	6.57	8.2	9.8	11.5	13.1	14.8	16.4	64.0
丙8	45	180		1.48	2.96	4.44	5.92	7.4	8.9	10.4	11.8	13.3	14.8	72.0
丁1	10	50	丁型（72°，接地线引入点）	4.91	9.82	14.7	19.6	24.5	29.5	34.4	39.3	44.2	49.1	20.0
丁2	15	75		3.45	6.9	10.3	13.8	17.2	20.7	24.1	27.6	31.0	34.5	30.0
丁3	20	100		2.68	5.36	8.0	10.7	13.4	16.1	18.7	21.4	24.1	26.8	40.0
丁4	25	125		2.2	4.4	6.59	8.8	11.0	13.2	15.4	17.6	19.8	22.0	50.0
丁5	30	150		1.87	3.74	5.61	7.48	9.4	11.2	13.1	15.0	16.8	18.7	60.0
丁6	35	175		1.63	3.26	4.9	6.53	8.2	9.8	11.4	13.1	14.7	16.3	70.0
丁7	40	200		1.45	2.9	4.34	5.8	7.2	8.7	10.1	11.6	13.0	14.5	80.0
丁8	45	225		1.3	2.61	3.91	5.22	6.5	7.8	9.1	10.4	11.7	13.1	90.0
戊1	10	60	戊型（60°，接地线引入点）	4.68	9.37	14.1	18.8	23.4	28.1	32.8	37.5	42.2	46.9	24.0
戊2	15	90		3.27	6.54	9.8	13.1	16.4	19.6	22.9	26.2	29.4	32.7	36.0
戊3	20	120		2.53	5.06	7.58	10.1	12.6	15.2	17.7	20.2	22.8	23.3	48.0
戊4	25	150		2.07	4.14	6.21	8.28	10.4	12.4	14.5	16.6	18.6	20.7	60.0
戊5	30	180		1.76	3.52	5.27	7.0	8.8	10.5	12.3	14.1	15.8	17.6	72.0
戊6	35	210		1.53	3.06	4.59	6.12	7.7	9.2	10.7	12.2	13.8	15.3	84.0
戊7	40	240		1.36	2.71	4.07	5.42	6.8	8.1	9.5	10.8	12.2	13.6	96.0
戊8	45	270		1.22	2.44	3.66	4.88	6.1	7.3	8.5	9.8	11.0	12.2	108.0
己1	10	80	己型（45°，接地线引入点）	4.34	8.68	13.0	17.4	21.7	26.1	30.4	34.7	39.1	43.4	32.0
己2	15	120		3.0	6.0	9.0	12.0	15.0	18.0	21.0	24.0	27.0	30.0	48.0
己3	20	160		2.31	4.62	6.93	9.24	11.6	13.9	16.2	18.5	20.8	23.1	64.0
己4	25	200		1.88	3.77	5.65	7.53	9.4	11.3	13.2	15.1	17.0	18.8	80.0
己5	30	240		1.59	3.18	4.78	6.37	8.0	9.6	11.2	12.8	14.3	15.9	96.0
己6	35	280		1.38	2.77	4.15	5.53	6.9	8.3	9.7	11.1	12.5	13.8	112.0
己7	40	320		1.22	2.45	3.67	4.9	6.1	7.3	8.6	9.8	11.0	12.2	128.0
己8	45	360		1.1	2.2	3.29	4.39	5.5	6.6	7.7	8.8	9.9	11.0	144.0
庚1	10	120	庚型（30°，接地线引入点）	4.1	8.2	12.3	16.4	20.5	24.5	28.6	32.7	36.8	40.9	48.0
庚2	15	180		2.8	5.6	8.4	11.2	14.0	16.8	19.6	22.4	25.2	28.0	72.0
庚3	20	240		2.1	4.3	6.4	8.6	10.7	12.8	15.0	17.1	19.2	21.4	96.0
庚4	25	300		1.7	3.5	5.2	6.9	8.7	10.4	12.3	13.9	15.6	17.3	120.0
庚5	30	360		1.5	2.9	4.4	5.8	7.3	8.8	10.2	11.7	13.1	14.6	144.0
庚6	35	420		1.3	2.5	3.8	5.1	6.3	7.6	8.9	10.1	11.4	12.6	168.0
庚7	40	480		1.1	2.2	3.3	4.5	5.6	6.7	7.8	8.9	10.0	11.2	192.0
庚8	45	540		1.0	2.0	3.0	4.0	6.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	216.0

放电管通常采用集中接地，即将同一地点所有的放电管集中接到一个接地装置上。如果接地点土壤电阻率大，而且要求较小的接地电阻值时，也可将放电管分组进行接地。例如，做一个 2Ω 的接地装置不如做两个 4Ω 的接地装置容易。

三、输电线路良导体屏蔽地线的接地装置

由理论分析可知，欲想获得屏蔽地线的良好屏蔽效果，降低屏蔽地线两端接地电阻是一个很重要的因素。工程中一般要求接地电阻为 1Ω 左右，属于大型接地装置。敷设低电阻的接地装置是比较困难的，尤其在高土壤电阻率地区是难以实现的，所以必须充分利用现有接地装置。若屏蔽地线一端在变电站，则该端的屏蔽地线接地装置应利用变电站的接地网。单独设置的接地装置需要进行现场调查和土壤电阻率测量，屏蔽地线接地点应结合终勘定位将屏蔽地线终端塔位选在土壤电阻率低、地形平坦、便于接地体敷设的地点。草绘塔位附近地形地貌图（如公路、河流、村庄和地形等），要标出屏蔽地线接地装置敷设点与塔位的相对位置和距离。

在土壤电阻率较高的山区，一个接地装置的接地电阻值难以满足设计要求，可在两个或两个以上邻近的杆塔都埋设屏蔽地线接地装置，并与输电线路地线的接地装置合并。接地装置型式可采用管带接地体，也可采用如图 6-48 所示的环形接地体，该图为某工程屏蔽地线接地装置设计的实例，接地电阻值为 1Ω，土壤电阻率是 300Ω·m。

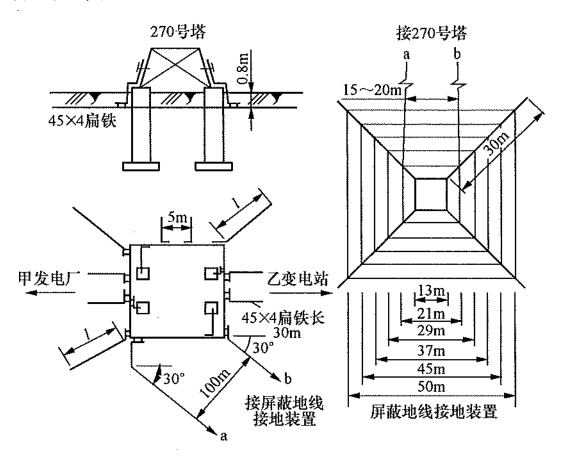


图 6-48 屏蔽地线接地装置联结示意图

输电线路良导体屏蔽地线的接地装置设计及相关要求可见第三章第九节内容。

四、新型接地材料

目前，常用的新型接地材料有铜覆钢接地体、离子接地体、石墨柔性复合接地体、接地模块等。当土壤腐蚀性较强时，为提高接地装置的使用寿命，可采用铜覆钢接地体或石墨柔性复合接地体；当土壤电阻率较大时，当采用常规接地无法满足要求时，可采用离子接地体或接地模块。接地装置材料的选择需根据工程实际情况，通过技术经济比较确定，并且满足国家及通信行业的规程规范要求。

第八节 大地电导率测量

输电线路对电信线路的感性耦合影响，取决于输电线路地中电流和输电线路与电信线路之间的互感系数，而大地电导率则是决定互感系数的重要因素。计算磁感应影响时大地电导率对计算结果具有显著的影响。大地电导率一般可通过实测、地质资料判定、查同类地质结构已测数据（或大地电导率分区图）等方法取得。

一、大地电导率与地中电流等效深度

在中性点直接接地系统中，当电力线路发生单相接地短路时，短路电流经故障点流入大地，这个以大地为回路的单相短路电流，对邻近电信线路产生磁感应影响，所以大地导电的特性，是确定磁感应影响的一个重要参数。大地电导率是大地电阻率的倒数。在工频时，大地电导率主要取决于几百米深度内的地质构造和地下水分布，与季节和温度变化的关系不大。大地岩层的构造是很复杂的，其电特性又很不相同，所以通过测量得出的大地电导率是电流场作用范围内多种岩层电导率的综合反映，即设想为均匀各向同性介质的电导率，在数值上等于同一条件下所测得的非均匀介质的电导率，则称为视在大地电导率，采用国际单位 S/m，其与过去常用的绝对电磁单位（CGSM）换算关系为

$$1\times10^{-14}\text{CGSM}=1\times10^{-3}\text{S/m}$$

大地一般为层状结构，由于类似集肤效应的作用，频率越高，电流入地的深度越小，即不同频率的电流流过的地层也不同，所以同一地质结构在不同频率时反映的大地电导率值是不同的，大地岩层的电特性也决定着地中电流的分布。虽然地中电流是扩散分布的，但可把扩散在大地中的电流看成是集中在距地表以下一定深度而方向相反、大小相等的虚构导线中流通。这种入地电流的等效深度 h_d 可表示为

$$h_d=660\sqrt{\frac{1}{\sigma f}} \tag{6-133}$$

式中 f ——入地电流频率，Hz；

σ ——大地电导率，S/m。

这样，输电线路对电信线路的影响可以看成是由

地上导线和地下等效导线两电流分别影响的合成，两者对电信线路的影响要相互抵消掉一部分，所以大地电导率愈小，入地电流的等值深度愈深，输电线路对电信线路的影响范围也就愈大。

由于电流入地深度不仅依赖于大地电导率，还依赖于电流频率。研究输电线路对电信线路的危险影响需要用 30、50Hz 的大地电导率，而研究干扰影响则需要用 800Hz 的大地电导率。

大地电导率获取的方法很多，如地质资料判定法、四极电测深法、电流互感法、电流自感法、线圈法、偶极法等，前两种是国内外推荐在工程中普遍采用的方法。

二、四极电测深法

四极电测深法是地球物理电法勘探中直流电法的电阻法，采用等距四极成直线排列，如图 6-49 所示。

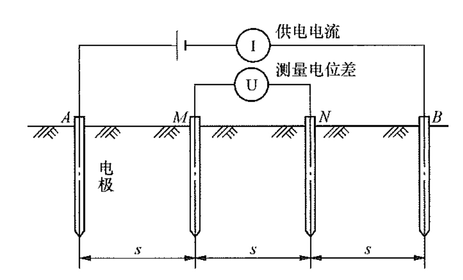


图 6-49　四极电测深法原理图

四极电测深法的实质是利用大地不同岩层具有不同电阻率的特点，将直流电送入地下建立稳定的人工电场，在测点处利用改变电极距离、即改变探测深度的办法来找出不同深度时岩层视在电阻率的变化关系，绘成实测曲线与已知理论曲线比较，分析得出各岩层电阻率的大小和岩层深度，然后根据拉德列曲线换算出所求影响电流频率下的视在大地电导率。

（一）基本原理

确定岩层电特性的方法，就是研究确定介质表面距电源某点的电位或电场强度，根据理论推导在两层介质对称四极装置中，电测深视在电阻率 ρ_k 的函数表达式为

$$\frac{\rho_k}{\rho_1}=f\left(\frac{AB}{2h_1},\frac{\rho_2}{\rho_1}\right) \tag{6-134}$$

式中　ρ_1、ρ_2——表层和下伏层电阻率，Ωm；

h_1——表层岩层深度，m；

AB——供电电极极距，m。

所以理论曲线是以 $AB/2h_1$ 和 ρ_2/ρ_1 为参变量来制作的。

实测视在电阻率 ρ_k 的计算值，可从均匀导电的半空间表面某点的电位求得：

$$\rho_k=\frac{\Delta U}{I}2\pi s \tag{6-135}$$

式中　ΔU——测量点位差，V；

I——测量供电电流，A；

s——相邻电极之间的距离，m。

实测时 ΔU 及 I 可由仪表读出，由式（6-135）可算得不同极距时的视在电阻率，逐点连接绘制成实测曲线。

（二）极距选择

由于四极电测深法的电极是等距和对称布置的，所以极距选择只需考虑供电电极 A、B 极距的选取问题。据理论分析 50Hz 电流的渗透深度最大可达数千米的广阔范围，但实践表明多数情况主要取决于 300～500m 的有效深度。等距四极法的探查深度约为 A、B 极距的三分之一。因此，A、B 最大极距可采用 900～1500m，一般平丘地区可用 900m，山区可用 1500m。A、B 最小极距的选择应大于电极入地深度的几倍，既要避免电极附近电位分布的影响，又要小于地表岩层的厚度，故一般选取 6～12m。中间极距的选择，则以能有效控制实测曲线的形状、取得完整的实测曲线为准，并无具体要求。工程上习惯有两种取法：一种是保持相邻 A、B 间极距的比值为定数，见表 6-49；另一种是考虑深层时测量比较困难，测值准确性对解释结果影响较大，因而随着极距的增加适当减小相邻 A、B 间极距的比值，见表 6-50。

表 6-49　电极间距离表（一）

$AB/2$（m）	6	12	25	50	100	200	450
$MN/2$（m）	2	4	8.3	16.7	33.3	66.7	150

表 6-50　电极间距离表（二）

$AB/2$（m）	6	12	24	42	70	120	190	300	460	750
$MN/2$（m）	2	4	8	14	23.3	40	63.3	100	153.3	250

（三）实测曲线绘制

把在现场用等距四极法测得的各不同极距的视在电阻率逐点绘制在模数为 6.25cm 的双对数坐标纸上，取横轴为 $AB/2$（m），纵轴为 ρ_k（Ω·m），连成光滑曲线即为实测曲线。图 6-50 是探测深度内岩层为两层且表层电阻率 ρ_1 小于下伏层电阻率 ρ_2 的例子。

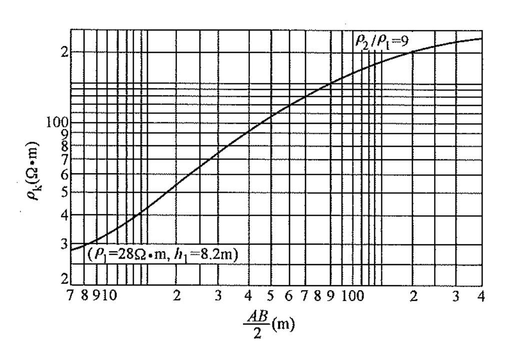


图 6-50 两层实测曲线图

图 6-51 是探测深度内岩层为三层且各层电阻率呈现 $\rho_1>\rho_2<\rho_3$ 的例子。

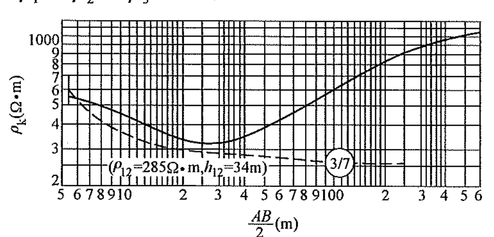


图 6-51 三层实测曲线图

（四）实测曲线解释

1. 量板法

量板法是用实测曲线与理论曲线（或称理论量板）相对比，来求取各岩层电阻率及厚度的一种方法。理论曲线常用的有培拉耶夫理论量板，它是按函数 $\rho_k/\rho_1=f(AB/2h_1,\ \rho_2/\rho_1)$ 及模数为 6.25cm 双对数坐标绘制的，横轴为 $AB/2h_1$，纵轴为 ρ_k/ρ_1，参变量为 ρ_2/ρ_1，如图 6-52 所示。

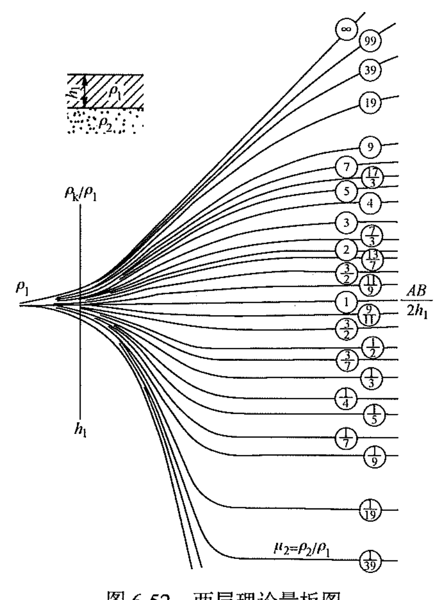


图 6-52 两层理论量板图

两层理论量板有以下特征：

（1）$\rho_2>\rho_1$ 时曲线皆在横轴之上，$\rho_2<\rho_1$ 时曲线皆在横轴以下；

（2）$\rho_2>\rho_1$ 时以 $\rho_2/\rho_1=\infty$，即以与横轴成 45° 的直线为渐近线，$\rho_2<\rho_1$ 时在 $AB/2h_1\geqslant10$ 时就都达到渐近线；

（3）当 $AB/2h_1\to0$ 时曲线左半部都汇集一起而达渐近值 $\rho_k/\rho_1=1$，即视在电阻率等于表层电阻率 ρ_1，当 $AB/2h_1>>1$ 时曲线右部也都趋向渐近值 $\rho_k/\rho_1=\rho_2/\rho_1$，即视在电阻率等于第二层电阻率 ρ_2，故不论 $AB/2h_1$ 为何值，ρ_k 总是介于 ρ_2 与 ρ_1 之间。

由于两层理论量板是按双对数坐标绘制的，故可将式（6-134）表示为

$$\log\rho_k-\log\rho_1=F\left(\log\frac{AB}{2}-\log h_1\right) \quad (6\text{-}136)$$

同样，实测曲线在双对数坐标系中的函数表达式也可表示为

$$\log\rho_k=F\left(\log\frac{AB}{2}\right) \quad (6\text{-}137)$$

比较式（6-136）和式（6-137）可知，在同一参变量时理论曲线和实测曲线的外形是相同的。只是两者的坐标轴在坐标系中有了位移，在横轴上移动了 $\log h_1$，在纵轴上移动了 $\log\rho_1$。所以，实测曲线解释的具体方法是：只要将实测曲线放在理论曲线上相对平移，找到实测曲线与理论曲线之一重合或有规律地介于相邻两理论曲线之间时，则理论曲线坐标原点在实测曲线坐标中的位置即为所求之 h_1 和 ρ_1。

以图 6-50 为例，找到实测曲线与 $\rho_2/\rho_1=9$ 的理论曲线相重合，由理论曲线坐标原点在实测曲线坐标中的位置可查取 $h_1=8.2$m，$\rho_1=28\ \Omega\cdot$m。由此得 $\rho_2=9\times28=252\Omega\cdot$m。

三层曲线可用三层理论曲线解释，也可仍用两层理论曲线结合辅助量板采用逐层等效的方法来解释，工程上习惯采用后者。三层曲线有四种可能的类型，分别称为 *H*、*A*、*K*、*Q* 型曲线，如图 6-53 所示。

辅助量板相应也有 *H*、*A*、*K*、*Q* 四种类型，如图 6-54 和图 6-55 所示。

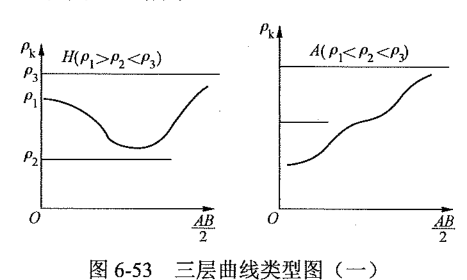


图 6-53 三层曲线类型图（一）

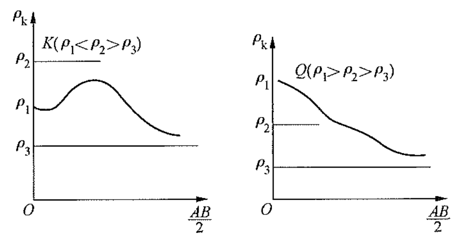


图 6-53　三层曲线类型图（二）

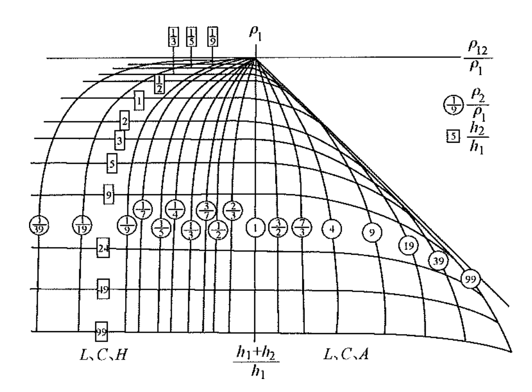


图 6-54　H、A 型辅助量板图

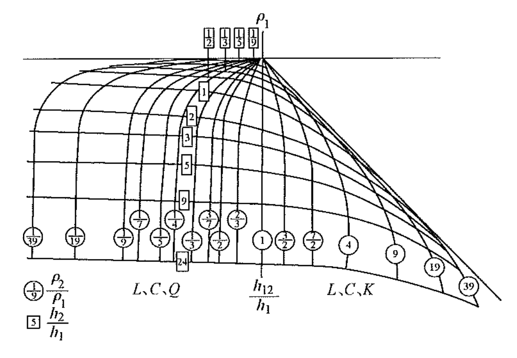


图 6-55　K、Q 型辅助量板图

以图 6-51 为例，先解释实测曲线的上两层，从前部找到与 $\rho_2/\rho_1=3/7$ 的理论曲线重合最多，记下理论曲线坐标原点在实测曲线坐标中的第一个位置；再把实测曲线放在同类型的辅助量板上，使原点位置与辅助量板的原点重合，保持坐标轴平示，画下参数相同的那条辅助曲线如图中虚线所示。然后，将上两层看成一个等效层再解释等效两层曲线，保持理论曲线的原点沿着辅助曲线的轨迹作平行移动，从后部找到与 $\rho_3/\rho_{12}=5$ 的理论曲线重合最多，由理论曲线坐标原点在实测曲线坐标中的第二个位置即可查得

$$h_{12}=h_1+h_2=34\text{m}$$

$$\rho_{12}=285\Omega\cdot\text{m}$$

故 $$\rho_3=5\times285=1425\Omega\cdot\text{m}$$

由于 Poliazek-Carson 互感系数公式是在假设大地具有均匀电导率的情况下导出的，因此在求得两层地质参数 ρ_1、ρ_2、h_1 或三层地质的等效两层参数 ρ_{12}、ρ_3、h_{12} 以后，还要根据拉德列曲线换算成 30、50Hz 或 800Hz 时的视在大地电导率，拉德列曲线如图 6-56 和图 6-57 所示。

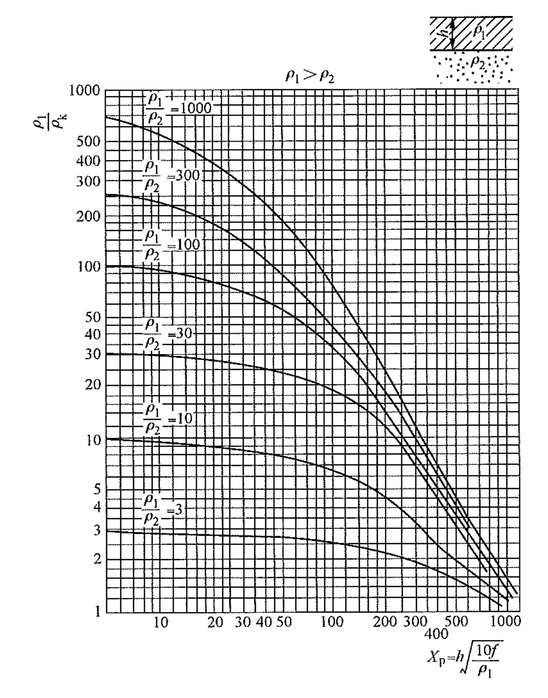


图 6-56　拉德列曲线（$\rho_1>\rho_2$）图

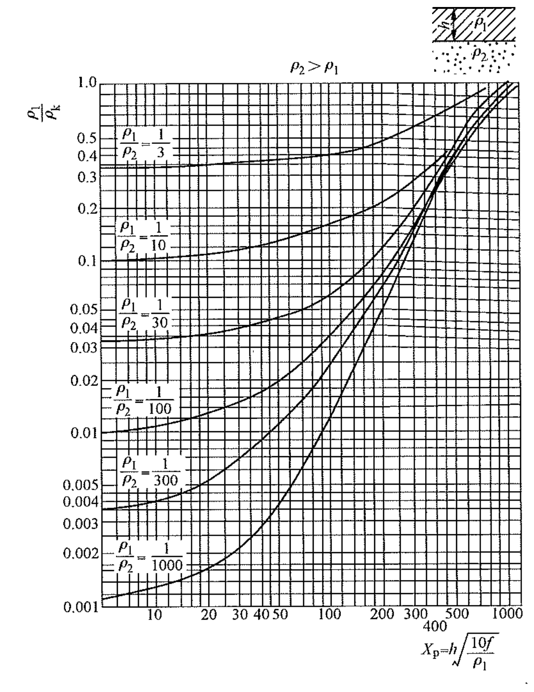


图 6-57　拉德列曲线（$\rho_2>\rho_1$）图

按上述两侧的计算参数，在 $\rho_1=28\Omega\cdot\text{m}$、$\rho_2=252\Omega\cdot\text{m}$、$h_1=8.2\text{m}$ 时可求得

$$X_P = h_1\sqrt{\frac{10f}{\rho_1}} = 8.2\times\sqrt{\frac{10\times 50}{28}} = 34.6$$

$$\rho_1/\rho_2 = 0.111$$

由图 6-57 查出 $\rho_1/\rho_k = 0.13$

故
$$\rho_{50} = \frac{\rho_1}{0.13} = \frac{28}{0.13} = 215.38\,\Omega\cdot\text{m}$$

$$\sigma_{50} = \frac{1}{\rho_{50}} = \frac{1}{215.38} = 4.64\times10^{-3}\ \text{S/m}$$

$$X_P = 8.2\times\sqrt{\frac{10\times 800}{28}} = 138.6$$

由图 6-57 查出 $\rho_1/\rho_k = 0.19$

故
$$\rho_{800} = \frac{\rho_1}{0.19} = \frac{28}{0.19} = 147.36\,\Omega\cdot\text{m}$$

$$\sigma_{800} = \frac{1}{\rho_{800}} = \frac{1}{147.36} = 6.78\times10^{-3}\ \text{S/m}$$

同理，在 $\rho_{12} = 285\Omega\cdot\text{m}$、$\rho_3 = 1425\Omega\cdot\text{m}$、$h_{12} = 34\text{m}$ 时可求得

$$X_P = h_{12}\sqrt{\frac{10f}{\rho_{12}}} = 34\times\sqrt{\frac{10\times 50}{285}} = 45$$

$$\rho_{12}/\rho_3 = 0.2$$

由图 6-57 查出 $\rho_{12}/\rho_k = 0.23$

故
$$\rho_{50} = \frac{\rho_{12}}{0.23} = \frac{285}{0.23} = 1239.13\,\Omega\cdot\text{m}$$

$$\sigma_{50} = \frac{1}{\rho_{50}} = \frac{1}{1239.13} = 0.807\times10^{-3}\ \text{S/m}$$

$$X_P = 34\times\sqrt{\frac{10\times 800}{285}} = 180$$

由图 6-57 查出 $\rho_{12}/\rho_k = 0.33$

故
$$\rho_{800} = \frac{\rho_{12}}{0.33} = \frac{285}{0.33} = 863.63\,\Omega\cdot\text{m}$$

$$\sigma_{800} = \frac{1}{\rho_{800}} = \frac{1}{863.63} = 1.15\times10^{-3}\ \text{S/m}$$

2. 简化法

简化法是用实测曲线与简化解释曲线相交直接求得视在大地电导率的一种方法。简化解释曲线是按照经验公式制成的，如图 6-58 所示，图中

C_1 的对数曲线方程为

$$s\sqrt{\sigma f} \approx 294$$

C_2 的对数曲线方程为

$$s\sqrt{\sigma f} \approx 184$$

式中　s——电位电极极距，m；

σ——大地电导率，S/m；

f——影响电流频率，Hz。

视在大地电导率的简易求法：

（1）将实测的 $\rho - \frac{AB}{2}$ 曲线铺上，坐标轴要重合。

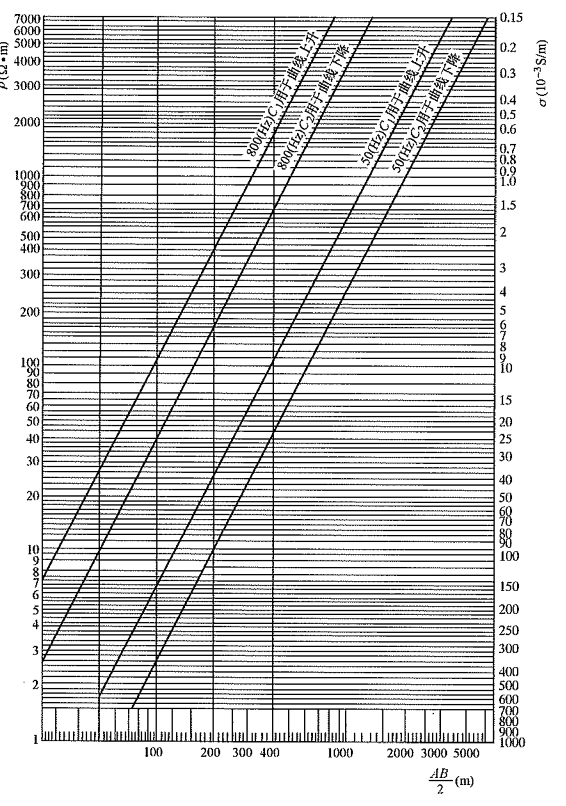


图 6-58　简化解释曲线图

（2）找出与 C_1 或 C_2（视曲线上升或下降）之交点，读右标尺即为视在大地电导率 σ。

（3）若曲线不相交说明采用之极距 AB 不够长，一般只得按曲线变化趋势估计延伸使之相交。

解释时保持实测曲线与简化解释曲线的坐标轴重合，视实测曲线的尾部是上升或下降分别与简化解释曲线 C_2 或 C_1 相交，由该交点右标尺读数即为所求的视在大地电导率。为与量板法相对照，仍由图 6-50、图 6-51 实测曲线采用简化法解释所得结果依次为：$\sigma_{50} = 4.4\times10^{-3}$S/m、$\sigma_{800} = 6.3\times10^{-3}$S/m、$\sigma_{50} = 0.86\times10^{-3}$S/m、$\sigma_{800} = 1\times10^{-3}$S/m。对照两种解释方法得出的两组数值，可以看出解释结果是比较接近的。

简化法虽简便易行，但在某些情况下解释结果有可能出现不容忽视的误差。例如视在电阻率大于 1000Ω·m 时，即使 $AB/2$ 测到 750m，实测曲线也远不能与简化解释曲线相交，因而只能根据实测曲线的变化趋势，估计延伸使之相交。再如地质构造复杂时，曲线本身形状变化较大，因而描绘实测曲线时局部形状不易控制，如果赶上交点附近也会导致解释结果产生误差。量板法则无此种局限性，实测曲线局部形状误差对解释结果的影响也较小。工程中应根据实测曲线的具体情况而采用不同的解释方法，最好办法是在现场采用简化法、室内整理采用量板法，相互对照以

取得满意的解释结果。

三、地质资料判定法

地质资料判定法，是根据普查的深层地质图或钻探的深层地质资料利用已知各类岩性的电阻率来判定大地电导率的一种方法。地质资料判定法不可能用以精确的确定大地电导率，一般可作为工程前期工作参考使用，表 6-51 给出了各类地质条件大地电导率值的变化范围。

表 6-51　各类地质条件大地电导率表　$\times 10^{-3}$S/m

地层岩性	气候条件——降雨量			地下碱水
	年降雨量超过 500mm		年降雨量少于 250mm	
	大概值	变化范围	变化范围	变化范围
1	2	3	4	5
冲积土和软黏土	200	500～100*	200～1*	1000～200
黏土（没有冲积层的）	100	200～100	100～10	—
泥灰岩（如考依波泥灰岩）	50	100～30	20～3	300～100
多孔的钙（如白垩）	20	30～10	20～3	300～100
多孔的砂岩（如考依波砂岩、黏板岩）	10	30～3		100～30
石英、坚硬的结晶灰岩（如大理石、石灰纪白垩）	3	10～1		100～30
黏板岩、板状页岩	1	3～0.3	≤1	
花岗岩	1	1～0.1		30～10
页岩、化石、片岩、片麻岩、火成岩	0.5	1～0.1		

注　1. 如已知年降雨量超过 500mm，可采用第 2 栏的数值。
2. 如有补充资料、特别是知道地下水位深度时，可按下列条件采用第 3、4、5 栏的数值。
（1）如年降雨量超过 500mm，当地是平原或是被宽的山谷所隔离的小山所环绕，又是古代岩层构成，对地下水位较浅（如在地表下 10m）的地区，采用第 3 栏的大地电导率最大值；对地下水位较深（如在地表下 150m）的地区，则采用第 3 栏的大地电导率最小值。
（2）对四周被明显的悬崖包围的小面积高台地，地下水可能在地表下很深处，在这种情况下，无论当地平均降雨量如何，均可采用第 4 栏的数值。第 4 栏的最小值适用于天气很干燥的情况，最大值适用于当地降雨量有规律的、即使是间断的情况。
（3）第 5 栏的数值与降雨量无关，适用于地面附近（如在 150m 以内）存在碱水的情况。第 5 栏的最大值适用于地下碱水较浅（在 10m 以内）的情况，最小值适用于地下碱水较深的情况。
“*”符号者与地下水位有关。

四、查大地电导率分区图

我国还没有编制全国范围内的大地电导率分区图，但有些地区或省份已编制了本地区的大地电导率分区图，例如东北地区早在 20 世纪 90 年代就编制了《东北地区大地电导率汇编及分区图》。本成果是依据新中国成立以来的遍布东北三省的一千二百多个大地电导率实测数据，结合测点处的地形地貌、岩石种类和地质情况，根据相同地层界中所含岩石种类基本相同，所以相同地层界可取相同的电导率的原则绘制而成的。分区图的绘制是将百万分之一的地质图按统计分析所推荐的大地电导率数值和结合设计经验进行划分，对于某些面积小的地质区域，分区时不宜单独划出，舍略划入邻近的其他地层界内。对于面积较大而又无测量数据或测量数据较少地区的电导率有待今后逐步补充确定。

百万分之一 50Hz 的大地电导率分区图，所标示的大地电导率数值，从宏观上来看可以达到一定的精度，在实际工程设计中为选定某一区段大地电导率时，须参照邻近地点大地电导率实测数值和地层岩性、地形、地貌等进行综合分析确定。

第九节　危险影响计算及防护设计例题

三相对称交流输电线路对电信线路的危险和干扰影响中感性耦合影响起主控作用，是通信保护设计的主要部分。由于输电线路对电信线路 800Hz 的干扰影响噪声计电动势计算方法与 50Hz 的危险影响磁感应纵电动势的计算方法基本相同，故设计算例只提出磁危险影响计算及防护设计，主要包括短路电流计算、危险影响计算、放电管配置计算和放电管接地电阻计算。

一、例题内容

甲发电厂至乙变电站，新建 220kV 系统中性点直接接地三相交流输电线路，线路长度 215km，架设两根钢质地线。输电线路在距甲发电厂 50km 处与某架空明线电信线路平行接近，接近长度 17.3km，两线路相对位置如图 6-59 所示。图中标出了大地电导率分段采用数值。

电信线路设备情况见图 6-59 中的电信线路回线及保护装置部分。

电力系统 10 年远景规划的正（负）序、零序网络图（系统阻抗图）见图 6-60、图 6-61，图中电抗是以 100MVA 为基准的标幺值。

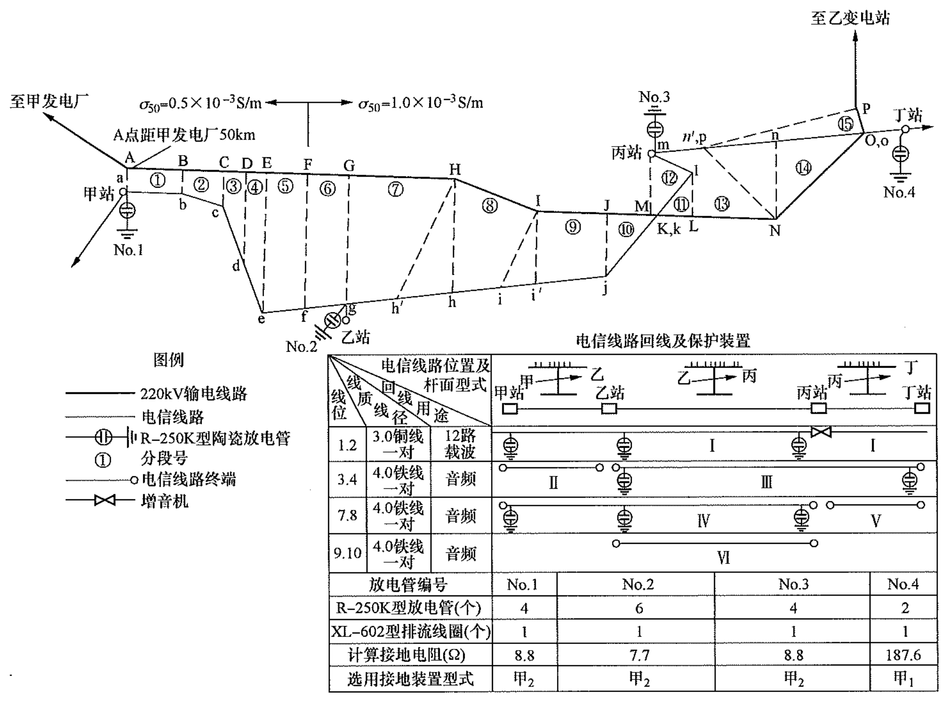


图 6-59 输电线路与电信线路平行接近和放电管安装位置图

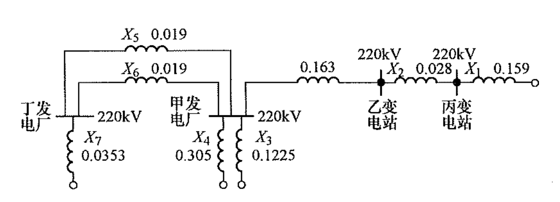


图 6-60 正（负）序网络图

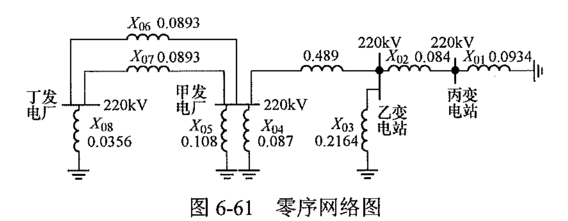


图 6-61 零序网络图

二、短路电流计算

(一) 网络简化

按网络简化要求和表 6-6 中的网络变换计算公式对图 6-60 正（负）序网络和图 6-61 零序网络进行简化计算。

1. 正（负）序网络简化

首先，将每一电抗都编上顺序号见图 6-60，在保留所需计算输电线路情况下对网络逐步进行简化

$$X_8 = X_1 + X_2 = 0.159 + 0.028 = 0.187$$

$$X_9 = \frac{X_3 X_4}{X_3 + X_4} = \frac{0.1225 \times 0.305}{0.1225 + 0.305} = 0.0874$$

$$X_{10} = X_7 + \frac{X_5 X_6}{X_5 + X_6} = 0.0353 + \frac{0.019 \times 0.019}{0.019 + 0.019} = 0.0448$$

$$X_{11} = \frac{X_9 X_{10}}{X_9 + X_{10}} = \frac{0.0874 \times 0.0448}{0.0874 + 0.0448} = 0.0296$$

得出保留所需计算输电线路的正（负）序等效网络如图 6-62 所示。

X_{11} 0.0296　0.163　X_8 0.187

甲发电厂　乙变电站

图 6-62 保留所需计算输电线路的正（负）序等效网络

如取定短路点 S_1 在乙变电站母线，则

$$X_{12} = X_{11} + 0.163 = 0.0296 + 0.163 = 0.1926$$

$$X_{13} = \frac{X_8 X_{12}}{X_8 + X_{12}} = \frac{0.187 \times 0.1926}{0.187 + 0.1926} = 0.095$$

最终得 S_1 点短路时正（负）序综合等效电路，如图 6-63 所示。

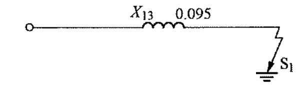


图 6-63 S_1 点短路时正（负）序综合等效电路

2. 零序网络简化

采取相同步骤，见图 6-61。

$$X_{09} = X_{01} + X_{02} = 0.0934 + 0.084 = 0.1774$$

$$X_{010} = \frac{X_{03} X_{09}}{X_{03} + X_{09}} = \frac{0.2164 \times 0.1774}{0.2164 + 0.1774} = 0.0975$$

$$X_{011}=\frac{X_{04}X_{05}}{X_{04}+X_{05}}=\frac{0.087\times0.108}{0.087+0.108}=0.0482$$

在图 6-61 中甲发电厂至丁发电厂间为同塔双回输电线路（架设两根钢质地线），其零序电抗 X_{06} 根据表 6-4 查得

$$X_{06}=X_{07}=4.7X_5=4.7\times0.019=0.0893$$

$$X_{012}=\frac{X_{06}X_{07}}{X_{06}+X_{07}}=\frac{0.0893\times0.0893}{0.0893+0.0893}=0.0447$$

$$X_{013}=X_{08}+X_{012}=0.0356+0.045=0.0803$$

$$X_{014}=\frac{X_{011}X_{013}}{X_{011}+X_{013}}=\frac{0.0482\times0.0803}{0.0482+0.0803}=0.0301$$

得出保留所需计算输电线路的零序等效网络如图 6-64 所示。

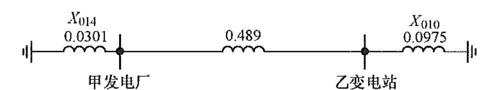


图 6-64 保留所需计算输电线路的零序等效网络

取定短路点 S_1 在乙变电站母线，则

$$X_{015}=X_{014}+0.489=0.0301+0.489=0.5191$$

$$X_{016}=\frac{X_{010}X_{015}}{X_{010}+X_{015}}=\frac{0.0975\times0.5191}{0.0975+0.5191}=0.082$$

最终得出 S_1 点短路时零序综合等效电路，如图 6-65 所示。

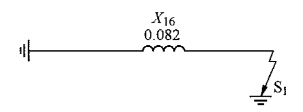


图 6-65 S_1 点短路时零序综合等效电路

（二）接地点总电流

中性点直接接地的三相输电线路发生单相接地短路时，根据第二节式（6-10），流经接地点的总的零序电流即接地短路电流

$$I_S=\frac{3}{2X_{13}+X_{016}}I_d=\frac{3\times251}{2\times0.095+0.082}=2770\text{ A}$$

I_d 数值由表 6-2 查得。

（三）短路电流分配

S_1 点接地短路时，由甲发电厂侧来之故障电流

$$I_{s1}=\frac{X_{016}}{X_{015}}I_s=\frac{0.082}{0.5191}\times2770=438\text{ A}$$

由乙变电站侧来之故障电流

$$I_{s2}=I_s-I_{s1}=2770-438=2332\text{ A}$$

本计算共取五个接地短路点，S_2 点取定在距乙变电站母线 $\frac{1}{3}l_D$ 处（l_D 为计算输电线路长度，$l_D=215$km）；S_3 点在距乙变电站母线 $\frac{2}{3}l_D$ 处；S_4 点在甲发电厂母线，为有效控制曲线形状，在距乙变电站母线 $\frac{6}{7}l_D$ 处取一接地短路点 S_5，各接地短路点的计算结果见表 6-52。

表 6-52 短路电流计算结果

接地短路点	短路点距甲发电厂距离（km）	接地点总电流 I_s（A）	甲发电厂侧来的电流 I_{s1}（A）	乙变电站侧来的电流 I_{s2}（A）
S_1（乙变电站母线）	215	2770	438	2332
S_2	143	2310	980	1330
S_3	72	2870	1980	890
S_5	30	/	3610	/
S_4（甲发电厂母线）	0	9070	8627	443

绘成短路电流曲线见图 6-66。

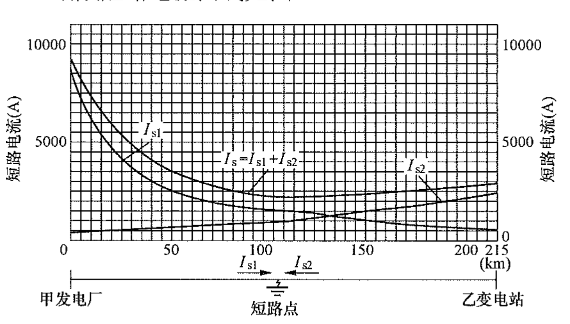


图 6-66 单相接地短路电流曲线

三、危险影响计算

（一）输电线路与电信线路间的互感阻抗

在图 6-60 两线路接近位置图上，按第四节的计算要求，在输电线路和电信线路每个转角点、大地电导率分界点、电信回路断开点和电信回路终端等处，按 $\frac{a_1}{a_2}=3\sim\frac{1}{3}$ 进行分段，图中共划分 15 段（①～⑮），按图纸所示比例将量得的 a_1、a_2 和 l_p 记入表 6-53 中。

根据等值接近距离 a 和大地电导率 σ_{50} 值，按第四节互感系数计算公式，计算出各接近段的互感系数和每千米的互感阻抗值（也可从图 6-27 中查取）。例如：①段由平行段互感系数计算公式式（6-53）计算出互感系数为 451.2μH/km，互感阻抗 ωM= 141.7mΩ/km；⑩段由交叉段互感系数计算公式式（6-63）、式（6-65）计算出互感系数为 373.9μH/km，互感阻抗 ωM= 117.4mΩ/km。然后将计算出的每千米的互感阻抗乘以接近段长度得出接近段的互感阻抗，计算结果列入表 6-53 中。

表 6-53 互感阻抗计算表

区段	段号	a_1 (m)	a_2 (m)	a (m)	l_p (km)	σ_{50} ($\times 10^{-3}$, S/m)	X	M (μH/km)	ωM (mΩ/km)	ωMl_p (mΩ)	$\sum \omega Ml_p$ (mΩ)
甲站	①	500	500	500	1.3	0.5	0.222	451.2	141.7	184.2	184.2
	②	500	750	612	1.0	0.5	0.272	413.4	129.8	129.8	314.0
～	③	750	2050	1240	0.5	0.5	0.551	285.8	89.7	44.9	358.9
	④	2050	3300	2600	0.5	0.5	1.155	165.2	51.9	26.0	384.9
	⑤	3300	3150	3220	1.0	0.5	1.430	134.4	42.2	42.2	422.7
乙站	⑥	3150	3000	3074	1.0	1.0	1.930	95.5	30.0	30.0	457.1
乙站	⑦	3000	2700	2846	2.5	1.0	1.787	104.9	32.9	82.3	82.3
	⑧	3100	1950	2459	2.0	1.0	1.544	123.9	38.9	77.8	160.1
～	⑨	1700	1500		1.6	1.0	1.003	186.6	58.6	93.8	253.9
	⑩	1500	0		1.2	1.0	0.942	373.9	117.4	140.9	394.8
	⑪	0	1000	1597	0.9	1.0	0.628	447.3	140.4	126.4	521.2
丙站	⑫	1000	1450	1204	1.0	1.0	0.756	231.9	72.8	–72.8	448.4
丙站	⑬	1450	1850	1638	3.0	1.0	1.029	182.7	57.4	172.2	172.2
～	⑭	2300	0		2.8	1.0	1.444	300.1	94.2	263.8	436.0
丁站	⑮	0	3300		0.7	1.0	2.072	241.9	75.9	–53.1	382.9

（二）纵电动势和对地电压计算

在输电线路上选取不同的接地短路点，按式（6-68）计算找出各电信回路的最大感应纵电动势，计算时不考虑地线的屏蔽作用，即 $k_n=1$，单相接地短路电流值在图 6-66 中查取，计算结果见表 6-54。从计算结果可以看出Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅵ回路感应纵电动势分别为 1403.9、735.9、1237.3、1403.9、747.9V，超过 650V（本工程为 220kV 高可靠输电线路，故障时间一般按 0.5s 考虑）的允许值，需根据式（6-71）、式（6-72）进行对地电压计算。经计算，Ⅰ、Ⅲ、Ⅳ回路的对地电压分别为 762.2、668.2、762.2V，具体计算情况见表 6-55，仍超过 650V 的对地电压允许值标准，需采取保护措施。

表 6-54 纵电动势计算表

计算区段	回线号	指定短路地点	短路点距甲厂距离 (km)	短路电流（A）		ωMl_p (mΩ)	纵电动势 (V)
				来自甲厂	来自乙变		
甲站～丙站	Ⅰ、Ⅳ	A 点 L 点	50 63.5	 2050	700 	978.3 978.3	479.4 1403.9
甲站～乙站	Ⅱ	A 点 G 点	50 55.3	 2300	700 	457.1 457.1	224.0 735.9
乙站～丁站	Ⅲ	G 点 P 点 O 点	55.3 68.9 68.2	 1920 1950	730 –810	831.3 831.3 884.4；–53.1	424.8 1117.3 1207.2＋30.1＝1237.3
丙站～丁站	Ⅰ、Ⅴ	M 点 P 点 O 点	62.5 68.9 68.2	 1920 1950	790 –810	382.9 382.9 436.0；–53.1	211.7 514.6 595.1＋30.1＝625.2
乙站～丙站	Ⅵ	G 点 L 点	55.3 63.5	 2050	750 	521.2 521.2	273.6 747.9

表 6-55 两端对地电压计算表

区段	回线号	段号	ωM (mΩ/km)	l_{Pi} (km)	影响电流 I_s (A)	l_{Ai} (km)	l_{Bi} (km)	l_S (km)	U_A (V)	U_B (V)
甲站 ～ 乙站	Ⅰ Ⅳ	① ② ③ ④ ⑤ ⑥	127.9 116.2 77.1 41.3 32.5 22.8	1.3 1.0 0.5 0.5 1.0 1.0	2050	0.9 1.9 3.1 4.5 5.6 6.7	16.7 15.5 14.3 12.9 11.8 10.7	17.4	639.0	762.2

续表

区段	回线号	段号	ωM（mΩ/km）	l_{Pi}（km）	影响电流 I_s（A）	l_{Ai}（km）	l_{Bi}（km）	l_S（km）	U_A（V）	U_B（V）
乙站～丙站	Ⅰ Ⅳ	⑦	25.3	2.5	2050	8.4	9.0	17.4	639.0	762.2
		⑧	30.8	2.0		10.7	6.7			
		⑨	49.0	1.6		12.6	4.8			
		⑩	106.2	1.2		14.2	3.2			
		⑪	128.8	0.9		15.7	1.7			
		⑫	62.5	1.0		16.8	0.6			
乙站～丙站	Ⅲ	⑦	25.3	2.5	1920	1.3	14.7	16.0	668.2	550.4
		⑧	30.8	2.0		2.5	15.5			
		⑨	49.0	1.6		5.3	10.7			
		⑩	106.2	1.2		7	9			
		⑪	128.8	0.9		8.6	7.4			
		⑫	62.5	1.0		9.7	6.3			
丙站～丁站		⑬	47.8	3.0	1920	11.7	4.3			
		⑭	83.8	2.8	1950	13.2	2.8			
		⑮	66.4	0.7	–810	13.1	2.9			

四、放电管配置计算

本计算例题对存在危险影响的电信回路，确定采用放电管保护，首先在各回路接近段终端装设放电管。当输电线路在 G 点接地短路时，Ⅰ、Ⅳ回线 No.1～No.3 放电管间电信导线对地电压根据式（6-76）计算得 545.1V，大于电信线路中间对地电压允许值 500V（为危险影响允许值 650V 减去放电管接地电阻允许压降 150V），故需在这两回线的 g 点处增加一组放电管，编号为 No.2。

各回线相邻放电管间电信导线对地电压计算结果见表 6-56，表中计算结果均能满足对地电压允许值要求。各回线放电管装设情况如图 6-59 所示。

表 6-56　　中间对地电压计算表

区间放电管编号	甲站～乙站 No.1～No.2				乙站～丙站 No.2～No.3			乙站～丁站 No.2～No.4			
假定短路地点	B 点	C 点	D 点	E 点	H-I 中点	J 点	K 点	I 点	J 点	K 点	M-N 中点
短路点距甲厂距离（km）	51.3	52.3	52.8	53.3	58.8	61.4	62.6	58.9	61.4	62.6	64
$\left(\sum \omega M l_P\right)_1$（mΩ）	184.2	314.0	358.9	384.9	121.2	253.9	394.8	160.1	253.9	394.8	534.5
来自甲厂短路电流 I_{s1}（A）	2420	2400	2370	2350	2200	2120	2100	2150	2120	2100	2050
纵电动势 E_1（V）	312.0	527.5	595.4	633.2	186.6	376.8	580.4	241.0	376.8	580.4	767.0
电信线长度 l_2（km）	5.82	4.77	3.37	2.07	7.6	4.2	2.3	12.3	10	8.1	4.5
$E_1 l_2$（V·km）	1815.8	2516.2	2006.5	1310.7	1418.2	1582.6	1334.9	2964.3	3768.0	4701.2	3451.5
$\left(\sum \omega M l_P\right)_2$（mΩ）	272.9	143.1	98.2	72.2	327.2	194.5	53.6	671.2	577.4	436.5	296.8
来自乙变短路电流 I_{s2}（A）	700	710	710	730	770	780	800	760	780	800	810
纵电动势 E_2（V）	133.7	71.1	48.8	36.9	176.4	106.2	30.0	357.1	315.3	244.4	168.3
电信线长度 l_1（km）	1.35	2.4	3.8	5.1	2.6	6	7.9	3.7	6	7.9	11.5
$E_2 l_1$（V·km）	180.5	170.6	185.4	188.2	458.6	637.2	237.0	1321.3	1891.8	1930.8	1935.5
$U_{0x}=\dfrac{E_1 l_2+E_2 l_1}{l_1+l_2}$ 计算点	b 点	c 点	d 点	e 点	h 点	j 点	k 点	i 点	j 点	k 点	p 点
计算值（V）	278.4	374.7	305.7	209.1	184.0	217.6	154.1	267.8	353.7	414.5	336.7

五、放电管接地电阻计算

1. 放电管接地电阻允许电压降

回线Ⅰ、Ⅳ的 No.1、No.3 放电管和回线Ⅲ的 No.2、No.4 放电管位于电信线路进站（或局）处，接地电阻电压降选取 350V，回线Ⅰ、Ⅳ的 No.2 为中间放电管，根据式（6-116），其接地电阻电压降为：

$$U_m < 2(U_e - U_{0max}) = 2\times(500-374.7) = 250.6V$$

为了施工和运行维护方便，一般都是将各回线同一地点的放电管接到一个接地装置上，只有当放电管接地电阻值要求较小时，才考虑分开接地。采取集中接地时，接地电阻电压降，要采取各组放电管中的较小值作为计算电压。Ⅰ、Ⅳ回线 No.2 放电管集中接地时，其允许电压降应为 250.6V。为了说明计算方法，Ⅴ、Ⅳ回线 No.2 放电管按两种接地方式考虑。

2. 电信线路线束阻抗计算

（1）No.1～No.2 间。

No.1～No.2 间接有放电管的电信导线共 4 根，其中铜线、铁线各 2 根，选择铁线中电流为 5A 时的线束阻抗，由图 6-39（c）查得 $Z_n = 0.88\Omega/km$，其中

一根铜线阻抗为

$$Z_{co} = Z_n(n_{co} + 0.069n_F) = 0.88\times(2+0.069\times2) = 1.88\Omega/km$$

一根铁线阻抗为

$$Z_F = Z_n(n_F + 14.5n_{co}) = 0.88\times(2+14.5\times2) = 27.3\Omega/km$$

（2）No.2～No.3 间。

No.2～No.3 间接有放电管的电信导线共 6 根，其中 2 根为铜线，4 根为铁线，选择铁线中电流为 5A 时线束阻抗，由图 6-39（c）查得，$Z_n = 0.81\Omega/km$，其中

一根铜线阻抗为

$$Z_{co} = Z_n(n_{co} + 0.069n_F) = 0.81\times(2+0.069\times4) = 1.84\Omega/km$$

一根铁线阻抗为

$$Z_F = Z_n(n_F + 14.5n_{co}) = 0.81\times(4+14.5\times2) = 26.7\Omega/km$$

（3）No.3～No.4 间。

No.3～No.4 间有 2 根铁线接有放电管，选铁线中电流为 5A 时的线束阻抗，由图 6-38 查得 $Z_n = 9.5\Omega/km$，其中一根铁线 $Z_F = 19\Omega/km$。

3. 接地电阻

各回线终端放电管和中间放电管的接地电阻计算结果见表 6-57 和表 6-58。Ⅰ、Ⅳ回线 No.2 放电管接地电阻电压降为 350V 或 250.6V 时，接地电阻值相差较大。在一条电信线路上，存在着起讫点不同的几条支路时，应对每个支路分别求出每个放电管的接地电阻，然后对各个支路装于同一杆位放电管的接地电阻，取各支路在该处电阻的并联值，放电管采用集中接地方式。

表 6-57　　终端放电管接地电阻计算表

回线号	放电管编号	接地电压降 U（V）	E_1（V）	$Z_{n1}l_1$（Ω）	$R_b = \frac{U_b Z_{n1} l_1}{E_1 - U_b - U_m}$（Ω）	E_2（V）	$Z_{n2}l_2$（Ω）	$R_e = \frac{U_e Z_{n2} l_2}{E_2 - U_e - U_m}$（Ω）
Ⅰ	No.1	350			∞	0.7×0.7×905.0＝443.7	$\frac{1}{2}$×(1.88×7.17＋1.84×10.2)＝16.1	∞
	No.2	350（250.6）	735.9	$\frac{1}{2}$×1.88×7.17＝6.7	65.3（17.3）	0.7×0.75×448.4＝235.4	$\frac{1}{2}$×1.84×10.2＝9.4	∞
	No.3	350	0.7×2.05×905.5＝1299.4	16.1	9.4			9.4
Ⅲ	No.2	350				424.8	$\frac{1}{2}$×(26.7×10.2＋19×16)＝288	∞
	No.4	350	1237.3	288	187.6			187.6
Ⅳ	No.1	350			∞	443.7	$\frac{1}{2}$×(27.3×7.17＋26.7×10.2)＝234.1	∞
	No.2	350（250.6）	735.9	$\frac{1}{2}$×27.3×7.17＝97.9	954.5（253.3）	235.4	$\frac{1}{2}$×26.7×10.2＝136.2	∞
	No.3	350	1299.4	234.1	136.7			136.7

注　∞表示放电回路中的电动势值小于回路中选定的接地电压降，接地电阻可取任意值。

表 6-58　　中间放电管接地电阻计算表

回线号	放电管编号	接地电压降 U_m（V）	E_1（V）	R_{bmin}（Ω）	$Z_{n1}l_1$（Ω）	$I_1=\frac{E_1-U_m}{R_{bmin}+Z_{n1}l_1}$（A）	E_2（V）	R_{emin}（Ω）	$Z_{n2}l_2$（Ω）	$I_2=\frac{E_2-U_m}{R_{emin}+Z_{n2}l_2}$（A）	$R_m=\frac{U_m}{I_1+I_2}$（Ω）
Ⅰ	No.2	350（250.6）	735.9	9.4	6.7	24.0（30.1）	235.4	9.4	9.4	−6.1（−0.8）	19.6（8.6）
Ⅳ	No.2	350（250.6）	735.9	136.7	97.9	1.6（2.1）	235.4	136.7	136.2	−0.4（−0.1）	291.7（125.3）

各处放电管采取集中接地，其接地电阻值如下：

No.1 放电管

$$R=\frac{1}{\frac{1}{9.4}+\frac{1}{136.7}}=8.8$$

No.2 放电管

$$R=\frac{1}{\frac{1}{187.6}+\frac{1}{8.6}+\frac{1}{125.3}}=7.7$$

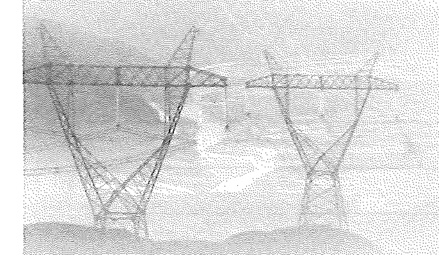
No.3 放电管

$$R=\frac{1}{\frac{1}{9.4}+\frac{1}{136.7}}=8.8$$

No.4 放电管

$$R=187.6$$

电信线路经过地区土壤电阻率为 200Ω • m，根据表 6-41，选择各处放电管的接地装置。以上的结果均列入图 6-59 中的电信线路回路及保护装置表内。



第七章

金　　具

输电线路主要由杆塔、导线、地线、绝缘子和金具等组成。将杆塔、导线、地线和绝缘子连接起来所用的金属零件，统称为输电线路金具。我国于20世纪50年代自行设计制造输电线路金具，到目前为止，输电线路金具已经得到很大的发展。本章详细地介绍了输电线路金具的分类、用途、使用说明、技术要求及安装方法等，以供科研、设计、制造等方面工作人员参考。

第一节　金具的选用

一、金具强度的安全系数

输电线路金具在大自然中长期运行，除需要承受导线、地线和绝缘子等自身的荷载外，还需承受覆冰和风的荷载。因此，输电线路金具应有足够的机械强度。

金具强度的安全系数应符合下列规定：

（1）最大使用荷载情况不应小于2.5；

（2）断线、断联、验算情况不应小于1.5。

二、金具的分类和用途

输电线路金具，按其性能、用途大致可分为悬垂线夹、耐张线夹、连接金具、接续金具、保护金具和拉线金具等六大类，各金具主要用途见表7-1。

三、悬垂线夹的选用

（一）悬垂线夹型式、结构

悬垂线夹有U型螺栓式悬垂线夹、上扛式悬垂线夹、提包式悬垂线夹、预绞式悬垂线夹、垂直双分裂提包式悬垂线夹、中心回转式悬垂线夹、跳线悬垂线夹、悬垂线夹（悬扛式）、铝合金悬垂线夹、XGF型悬垂线夹、XF型悬垂线夹等等，详见附录D。其中U型螺栓式固定悬垂线夹是目前常用的定型产品，见图7-1。

表7-1　　输电线路金具的分类和主要用途表

分类	名　称	主　要　用　途
悬垂线夹	悬垂线夹	用于将导线固定在直线杆塔的悬垂绝缘子串上，或将地线悬挂在直线杆塔的地线支架上
耐张线夹	螺栓型耐张线夹	用于将导线固定在耐张、转角杆塔的绝缘子串上。适用于固定中小截面导线
	压缩型耐张线夹	压缩型耐张线夹分两种，一种用于将导线固定在耐张、转角杆塔的绝缘子串上，适用于固定大截面导线。另一种用于将地线固定在耐张、转角杆塔上
	楔型耐张线夹	用于将地线固定在耐张、转角杆塔上
连接金具	U型挂环、二联板、直角挂板、延长环、U型螺栓等	这类金具又称为通用金具，多用于绝缘子串与杆塔之间、线夹与绝缘子串之间及地线线夹与杆塔之间的连接
	球头挂环、碗头挂板	连接球窝型绝缘子的专用金具
接续金具	接续管（圆形）	一种用于大截面导线的接续，另一种用于地线的接续
	接续管（椭圆形）	用于中小截面导线的接续
	补修管	一种用于导线的补修，另一种用于地线的补修
	并沟线夹	一种用于导线作为跳线时的接续，另一种用于地线作为跳线时的接续

续表

分类	名　称	主　要　用　途
保护金具	防振锤	用来抑制导线、地线振动，起保护作用
	间隔棒	固定分裂导线排列的几何形状
	均压环与屏蔽环	均压环用来改善绝缘子串中绝缘子的电压分布；屏蔽环使被屏蔽范围内金具不出现电晕现象
	防舞金具	用来抑制线路舞动的金具
	预绞丝护线条、铝包带	起保护导线的作用
	重锤	抑制悬垂绝缘子串及跳线绝缘子串摇摆角过大及直线杆塔上导线、地线上拔
	招弧角	用于在发生闪络时保护绝缘子并帮助拉断电弧
拉线金具	UT 型线夹	可调式的用于固定和调整杆塔拉线下端，不可调式的用于固定杆塔拉线上端
	楔型线夹	用于固定杆塔拉线上端
	拉线二联板	用于联结两根组合拉线

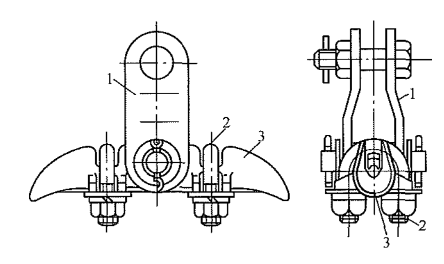


图 7-1　悬垂线夹

1—挂架；2—U 型螺栓；3—船体

悬垂线夹悬挂导线时，应能承受导线传给的全部荷载，并且在线路正常运行或断线时不允许导线在线夹内滑动或脱离绝缘子串。因此，使用这种线夹时杆塔承受的断线张力较大。

悬垂线夹悬挂地线时，同样应能承受地线传给的全部荷载，并且当地线产生不平衡张力时，亦不允许地线在线夹内滑动。

悬垂线夹按使用导线或地线的型号划分为若干种。在设计选用时必须根据导线或地线直径（包括缠铝包带厚度或护线条直径）及其荷载大小选配合适的线夹型号。

（二）悬垂线夹的机械强度

悬垂线夹在线路运行情况下，应能承受导线或地线的垂直与水平荷载形成的综合荷载。当导线或地线发生最大荷载时，应具有一定的安全裕度。

悬垂线夹的破坏载荷计算公式为

$$P=K\sqrt{(l_{H}g_{H})^{2}+(l_{v}g_{V})^{2}} \tag{7-1}$$

式中　P——悬垂线夹的破坏载荷，N；

K——安全系数；

l_H——每个线夹承受的导线（或地线）的水平档距，m；

l_v——每个线夹承受的导线（或地线）的垂直档距，m；

g_H——单位长度导线（或地线）控制工况时风荷载，N/m；

g_V——单位长度导线（或地线）控制工况时垂直荷载，N/m。

（三）悬垂线夹的握力

悬垂线夹在线路正常运行或断线情况下，对导线（或地线）应具有一定握力，即此时导线（或地线）不许从线夹中滑出。

GB/T 2314—2008《电力金具通用技术条件》给出了固定型悬垂线夹对导线或地线的握力，以导线或地线的计算拉断力的百分数表示，其值应不小于表 7-2 的规定。

表 7-2　悬垂线夹握力与导线、地线计算拉断力之比

绞线类别	铝钢截面比 α	百分比（%）
钢绞线、铝包钢绞线、钢芯铝包钢绞线	—	14
钢芯铝绞线	$\alpha\leqslant2.3$	14
钢芯铝合金绞线	$2.3<\alpha\leqslant3.9$	16
铝包钢芯铝绞线	$3.9<\alpha\leqslant4.9$	18
钢芯耐热铝合金绞线	$4.9<\alpha\leqslant6.9$	20
铝包钢芯铝合金绞线	$6.9<\alpha\leqslant11.0$	22
铝包钢芯耐热铝合金绞线	$\alpha>11.0$	24
铝绞线、铝合金绞线、铝合金芯铝绞线	—	24
铜绞线	—	28

（四）悬垂线夹的最大出口角

在输电线路工程中，由于地形起伏、档距不等以及荷载或气温的变化，使直线杆塔悬挂点两侧的导线或地线产生不同的出口角。因而要求悬垂线夹的船形体，除必须具有一定的曲率半径 ρ 外，还必须有足够的最大出口角 φ，如图 7-2 所示，才能保证导线或地线在线夹出口附近不受较大的弯曲应力，以避免发生局部机械损伤引起断股或断线。

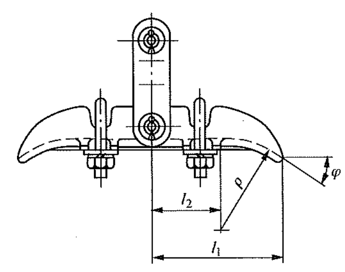


图 7-2 悬垂线夹的最大出口角

悬垂线夹的曲率半径 ρ，一般不小于所使用导线直径的 8 倍。线夹最大出口角 φ 可计算为

$$\varphi = \arcsin\frac{l_1 - l_2}{\rho} \qquad (7\text{-}2)$$

式中 l_1、l_2——线夹长度，见图 7-2。

由式（7-2）可知，由于线夹的曲率半径 ρ 和长度 l_1 及 l_2 是一定的，因此它的最大出口角也是一定的，而导线或地线的悬垂角则是变化的。当线夹两侧导线或地线的悬垂角不等时，线夹将绕中心回转轴旋转直至平衡，并产生一偏转角β，见图 7-3。

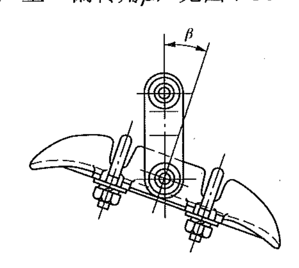


图 7-3 中心回转式悬垂线夹的偏转角

显然，在$\theta_A > \theta_B$（见图 7-4）的情况下，导线或地线在线夹上的安全运行条件应满足式(7-3)的要求。

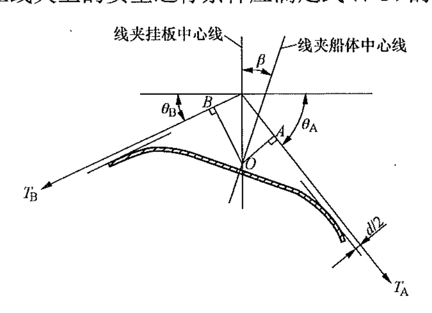


图 7-4 中心回转式悬垂线夹偏转角 β 求解图

$$\theta_A - \beta < \varphi \text{ 或 } \theta_B + \beta < \varphi \qquad (7\text{-}3)$$

式中 θ_A、θ_B——悬垂线夹两侧导线或地线的悬垂角；

β——悬垂线夹船形体的偏转角。

关于 β 值的求法，即当悬垂线夹船体处于平衡状态时，线夹两侧导线或地线悬挂点的张力 T_A、T_B 对线夹中心回转轴 O 点的力矩相等，见图 7-4。

中心回转式线夹的 β 角可计算为

$$\tan\beta = \frac{W_A - W_B}{2T} = \frac{G}{2T}(l_{VA} - l_{VB}) \qquad (7\text{-}4)$$

式中 T——计算条件下导线张力，N；

G——计算条件下导线单位重力，N/m；

l_{VA}——计算条件下前侧单侧垂直档距，m；

l_{VB}——计算条件下后侧单侧垂直档距，m。

但是，值得注意的是悬垂线夹船体的偏转角 β 是有一定限度的，当船体转到某一角度β_0时，船体上的 U 型螺栓将被挂架挡住，见图 7-5，β_0 则称为悬垂线夹的最大偏转角。此时悬垂线夹的安全运行条件应是 $\beta < \beta_0$。

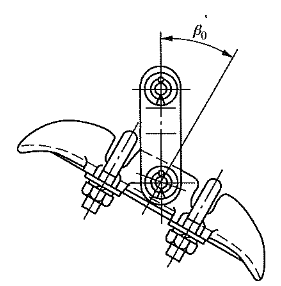


图 7-5 悬垂线夹的最大偏转角

β_0 除与杆塔悬挂点两侧导线或地线的悬垂角θ_A、θ_B 有关外，还与导线或地线的直径（导线外径应包括缠铝包带厚度或护线条直径）有关，直径越大 U 型螺栓越往上移，则β_0 角就越小。若 $\beta > \beta_0$ 时应采取措施，如改用双线夹，调整塔高、塔位，或特殊设计新型线夹等。

四、耐张线夹的选用

（一）导线用耐张线夹

导线用耐张线夹一般分为两类，第一类用螺栓将导线压紧固定，线夹只承受导线全部拉力（即导线计算拉断力），无导电用途。这类线夹称为螺栓型耐张线夹，见图 7-6。

螺栓型耐张线夹，其主要优点是施工安装方便，并对导线有足够的握力，质量也较轻。因此，以往被广泛地应用到输电线路上。螺栓型耐张线夹适用于安装中小截面的导线。

第二类称为压缩型耐张线夹，采用液压或爆压方法将导线的铝股、钢芯与线夹的铝管、钢锚压在一起，

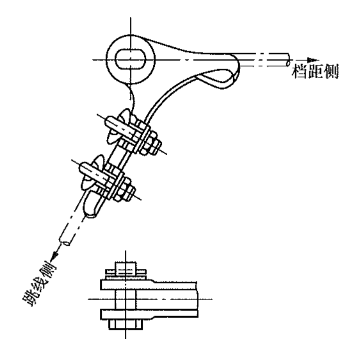
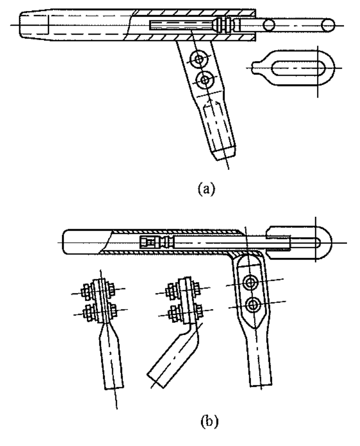


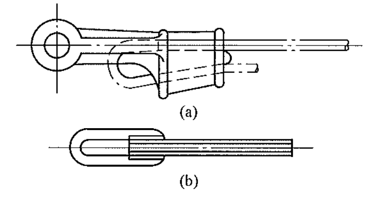
图 7-6 导线用螺栓型耐张线夹

见图 7-7。线夹本身除承受导线的全部拉力（即导线的计算拉断力）外，还是导电体，这类线夹适用于安装大截面的导线，分为爆压型和液压型。液压型连接导线的耐张线夹，其钢锚和铝管压后外形为正六角形或多角形。


图 7-7 导线用压缩型耐张线夹
（a）液压型；（b）爆压型

（二）地线用耐张线夹

地线用耐张线夹，按其结构分为楔型及压缩型两种，见图 7-8。


图 7-8 地线用耐张线夹
（a）楔型；（b）压缩型

楔型耐张线夹，可用于地线的终端，也可用于固定杆塔的拉线。由于楔型线夹具有施工方便和运行可靠等优点，所以被广泛地应用到输电线路上。但是，楔型线夹在施工安装时必须把所安装的钢绞线弯曲成圆弧状，才能使其紧密地贴在线夹的楔子上。安装经验证明：楔型线夹一般适合安装截面积 70mm² 及以下钢绞线；对截面积 70mm² 以上的钢绞线宜采用压缩型耐张线夹。

（三）对耐张线夹的要求

（1）GB/T 2314—2008《电力金具通用技术条件》给出了耐张线夹和接续金具对导线、地线的握力与导线、地线计算拉断力之比应不小于表 7-3 的规定。

表 7-3 耐张线夹和接续金具握力与导线、地线计算拉断力之比

金具类别	百分比（%）
架空电力线路用压缩型金具（耐张线夹、接续金具） 预绞式接续金具和预绞式耐张线夹	95
架空电力线路用非压缩型金具（螺栓型耐张线夹、楔型耐张线夹）	90

（2）导线接续处两端点之间的电阻，压缩型金具，应不大于同样长度导线的电阻；非压缩型金具，应不大于同样长度导线电阻的 1.1 倍；导线接续处的温升应不大于被接续导线的温升；载流量应不小于被安装导线的载流量。

五、连接金具

（一）连接金具的分类

连接金具为导线、地线金具串中除绝缘子、线夹、均压屏蔽金具及保护金具之外的所有金具。主要用于绝缘子串与杆塔之间、线夹与绝缘子串之间及地线线夹与杆塔之间的连接。连接金具分为专用连接金具和通用连接金具两大类。

1. 专用连接金具

专用连接金具是直接用来连接绝缘子的，故其连接部位的结构尺寸与绝缘子相配合。用于连接球窝型绝缘子的连接金具，有球头挂环、碗头挂板等。用于连接槽型绝缘子的有平行挂板、直角挂板和直角挂环等。专用连接金具外形图如图 7-9 所示。

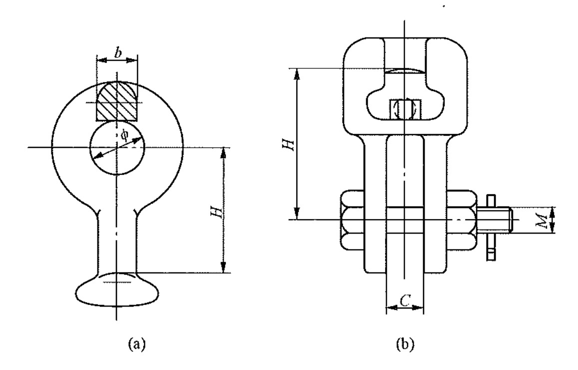


图 7-9 专用连接金具外形图
（a）球头挂环；（b）碗头挂板

2.通用连接金具

通用连接金具，用于将绝缘子组成两联、三联或更多联数，并将绝缘子串与杆塔横担或与线夹之间相连接，也用来将地线紧固或悬挂在杆塔上，或将拉线固定在杆塔上等。根据用途不同，连接金具有不同形式和品种。定型金具有U型挂环、U型挂板、直角挂环、平行挂板、延长环和二联板等。主要通用连接金具外形图如图7-10所示。

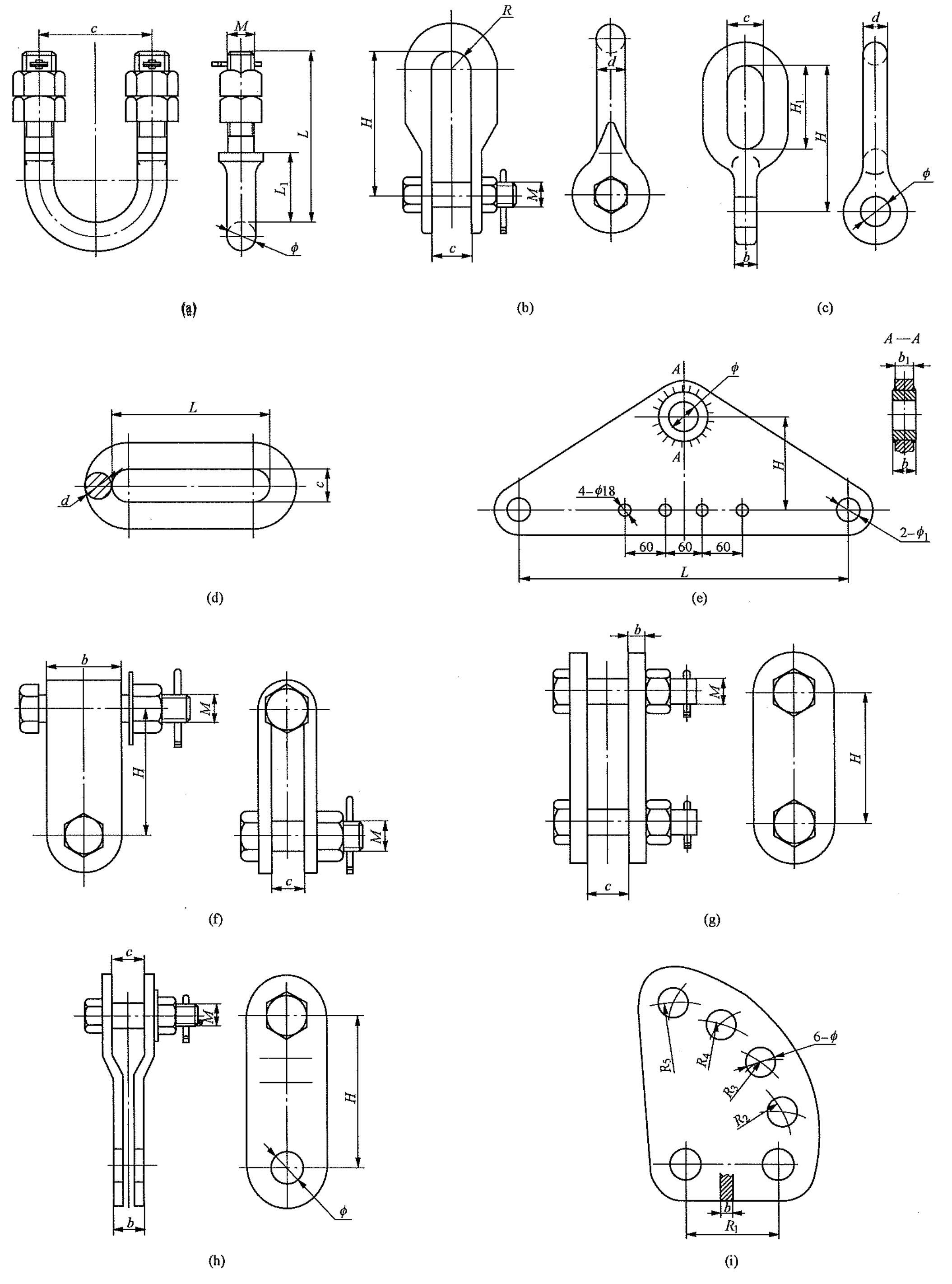


图 7-10 主要通用连接金具外形图

(a) U型螺栓；(b) U型挂环；(c) 直角挂环；(d) 延长环；(e) 三角联板；(f) UB挂板；(g) 平行挂板；(h) PS平行挂板；(i) DB调整板

另外根据连接金具的结构特点和使用条件，连接金具又可分为三个系列：

（1）环—链系列连接金具。该系列金具结构为环与环相连，属于线—线接触金具，它属于通用连接金具。

（2）板—板系列连接金具。该系列金具必须借助于销钉或螺栓才能实现，它也属于通用连接金具。

（3）球—窝系列连接金具。该系列金具是根据与绝缘子连接的结构特点设计出来的，用于直接与绝缘子相连接，它属于专用连接金具。

（二）连接金具的选用

1. 连接金具的破坏载荷

连接金具的机械强度按不同的标称破坏载荷划分载荷等级，相同载荷等级的连接金具具有广泛的互换性。连接金具的机械强度安全系数应满足本章第一节的要求。

为了简化金具的载荷等级，提高金具的互换性，连接金具在实际设计时的机械强度不是按导线拉力选定，而是按绝缘子的机电破坏载荷确定，即每一种机电破坏载荷的绝缘子与相同载荷等级的金具配套使用。

根据 GB/T 2315—2008《电力金具标称破坏载荷系列及连接型式尺寸》的规定，金具标称破坏载荷系列分为 13 个等级。

槽型连接示意图见图 7-11，槽型连接金具标称破坏载荷及连接型式尺寸见表 7-4。

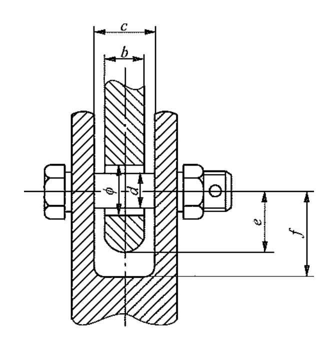


图 7-11　槽型连接示意图

表 7-4　　槽型连接金具标称破坏载荷及连接型式尺寸

标记	4	7	10	12	16	21	25	32	42	55	64	84	100
标称破坏载荷（kN）	40	70	100	120	160	210	250	320	420	550	640	840	1000
螺栓直径 d（mm）	16	16	18	22	24	24	27	30	36	36	42	48	52
螺栓抗拉强度（MPa）	≥400				≥600								
螺栓孔径 ϕ（mm）	18	18	20	24	26	26	30	33	39	39	45	51	55
孔径偏差（mm）	±0.5						±0.75						
单板厚度 b（mm）	12	16	16	16	18	20	24	28	32	32	36	36	40
双板开档 c（mm）	15	19	19	20	22	24	28	32	36	36	40	44	49
孔边距 e（mm）	20	22	24	30	32	32	36	40	45	48	55	62	66
槽深 f（mm）	≥22	≥24	≥26	≥32	≥34	≥34	≥38	≥42	≥48	≥51	≥58	≥66	≥70
材料强度（MPa）	≥375				≥500								

环型连接示意图见图 7-12，环型连接金具标称破坏载荷及连接型式尺寸见表 7-5。

2. 连接金具机械荷载的核定

连接金具机械荷载，在一般情况下按已选定的绝缘子的机械破坏荷载来确定。每一种型式的绝缘子配备一套与其机械破坏荷载相同的金具。对双联绝缘子用的金具，其机械破坏荷载为单联绝缘子金具的二倍；三联绝缘子用的金具，其机械破坏荷载不小于绝缘子破坏荷载的三倍。例如：用于 XP-70 型绝缘子的金具，其破坏荷载应不小于 70kN；用于 XP-160 型绝缘子的金具，其破坏荷载应不小于 160kN。

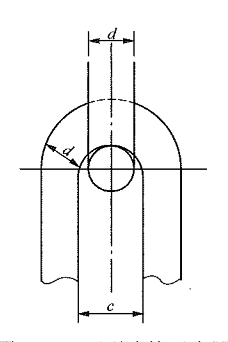


图 7-12　环型连接示意图

表 7-5　　环型连接金具标称破坏载荷及连接型式尺寸

标记	4	7	10	12	16	21	25	32	42	55	64	84	100
标称破坏载荷（kN）	40	70	100	120	160	210	250	320	420	550	640	840	1000
圆环直径 d（mm）	12	16	16	18	20	20	24	28	32	32	36	40	45
开档 c（mm）	15	19	19	22	24	24	28	32	36	36	40	44	49
材料强度（MPa）	≥375				≥500								

地线所用的连接金具，用于悬垂时，其破坏荷载除以金具的安全系数后，应不小于地线的最大荷载；用于耐张时，其破坏荷载应与地线强度配合。

六、寒冷地区金具材质的选择

（一）常用金具材质的冲击韧性试验

众所周知，金属材料（尤其是钢及各种合金钢）随着环境温度的降低，其冲击韧性将会有所下降，从而导致脆断（即低温冷脆现象），通过试验，各种金属在不同温度时的冲击吸收功曲线如图 7-13 所示。

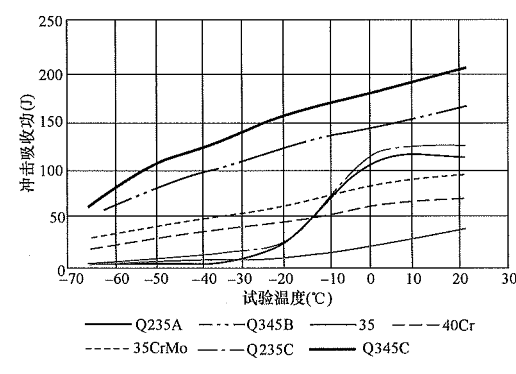


图 7-13　各种金属在不同温度时的冲击吸收功曲线

根据图 7-13 所示曲线，现对各种金属材料的冲击性能分析如下：

（1）Q345B 和 Q345C 冲击韧性指标分析。现将图 7-13 所示 Q345B 和 Q345C 的冲击吸收功（J）与 Q345 力学性能标准（摘自 GB/T 1591—2008《低合金高强度结构钢》）所要求的冲击吸收功（A_{KV}）对照列于表 7-6。

表 7-6　Q345 冲击功试验数据与标准对照表

钢材品种	要求	冲击吸收功 A_{KV}（J）			
		+20℃	0℃	−20℃	−40℃
Q345B	GB/T 1591—2008 要求值	34			
	试验值	166	148	129	$87<A_{KV}<106$
Q345C	GB/T 1591—2008 要求值		34		
	试验值	208	185	161	$108<A_{KV}<133$
Q345D	GB/T 1591—2008 要求值			34	
Q345E					27

由图 7-13 及表 7-6 可以看出：

1）Q345B 和 Q345C 随着温度的降低，冲击功明显下降，表现出一定的低温脆性；

2）Q345B 和 Q345C 均具有较高的冲击韧性，而且 Q345C 比 Q345B 更高；

3）Q345B 和 Q345C 试验所得各温度下的冲击吸收功远大于 GB/T 1591—2008 规定的要求。这就说明，在一定的低温范围内使用 Q345B 和 Q345C 是具有较高的安全储备的。

（2）Q235A 和 Q235C 冲击韧性指标分析。现将图 7-13 所示 Q235A 和 Q235C 的冲击吸收功与 Q235 力学性能标准（摘自 GB/T 700—2006《碳素结构钢》）所要求的冲击吸收功 A_{KV} 对照列于表 7-7。

表 7-7　Q235 冲击功试验数据与标准对照表

钢材品种	要求	冲击吸收功 A_{KV}（J）				
		+20℃	0℃	−20℃	−35℃	−50℃
Q235A	GB/T 700—2006 要求值	27	27	27		
	试验值	116	112	29	7	5
Q235C	GB/T 700—2006 要求值	27	27	27		
	试验值	128	119	31	17	10

由图 7-13 及表 7-7 可以看出：

1）Q235A 和 Q235C 均大于规程规定的标准；

2）Q235A 和 Q235C 随着温度的降低，冲击功明显下降，且呈现了清晰的韧脆转变温度，低温脆性特征十分明显。初步判断，由冲击吸收功—温度曲线所示的韧脆转变温度 t_k 约为−10℃，在此应该提及的是，韧脆转变温度 t_k 并非材料使用的严格的限值标准，而是表示材料的脆性倾向指标。

3）Q235A 和 Q235C 二者的冲击韧性相差不大而以 Q235C 较好。尤其在−20～−50℃范围内，这一优势更加明显。这也就是说，Q235C 与 Q235A 相比，将更适合于在低温范围内的应用。

（3）35CrMo 和 40Cr 冲击韧性指标分析。现将 35CrMo 和 40Cr 在各温度下的冲击吸收功试验数据列于表 7-8，表中一并列出 GB/T 3077—2015《合金结构钢》要求的冲击功指标以资对照。

表 7-8　35CrMo 和 40Cr 冲击功试验数据与标准对照表

钢材品种	要求	冲击吸收功 A_{KU2}（J）					
		+20℃	0℃	−20℃	−35℃	−50℃	−65℃
35CrMo	试验值	98	88	65	55	45	32
	GB/T 3077—2015 要求值	63*					
40Cr	试验值	73	66	48	41	33	20
	GB/T 3077—2015 要求值	47*					

* 表中 GB/T 3077—2015 所列冲击功为 A_{KU2}（系指 2mm U 型缺口试样夏比冲击吸收功），而试验中则是 A_{KV}（系指 V 型缺口试样夏比冲击吸收功）。各有关文献均指出：A_{KU2} 与 A_{KV} 二者没相互对应关系，因此，所示数据没有可比性。

由图 7-13 及表 7-8 可以看出：

1）35CrMo 与 40Cr 两种金属的冲击吸收功均随试验温度的下降而下降，但下降缓慢，表现其低温脆性转变不明显；

2）由表 7-8 注释可知，试验中的冲击吸收功（A_{KV}）与 GB/T 3077—2015 规定的冲击吸收功（A_{KU2}）二者没有可比性，但试验则可与 Q345 钢及 Q235 钢标准规定值相比（Q235 及 Q345 标准规定均采用 A_{KV}）。由表 7-8 所示试验数据，与表 7-6 所示 Q345 GB/T 1591—2008 规定的 A_{KV} 值相比可以看出，40Cr 金属在−50℃时的冲击吸收功为 33J，而 Q345 在−40℃时也仅为 27J。由此可以看出，40Cr 的低温冲击韧性要比 Q345 好。同时，由表 7-8 所示数据可以看出，35CrMo 的低温冲击韧性比 40Cr 更好。由此可以认为，两种金属均可用于低温金具制造。

3）35CrMo、40Cr 材料的抗冲击性能受到热处理技术水平影响较大，采用该材料制造产品时的生产工艺相对复杂。

（4）35 号钢冲击韧性指标分析。现将 35 号钢各温度下的冲击吸收功的准确数值列于表 7-9。

表 7-9　35 号钢冲击试验数据

	冲击吸收功 A_{KV}（J）					
温度	+20℃	0℃	−20℃	−35℃	−50℃	−65℃
试验值	41	24	11	9	6	4

由表 7-9 可以看出，35 号钢冲击韧性较差，不适合在寒冷低温地区使用。

（二）主要金具品种材料选择及主要加工工艺要求

现将输电线路主要金具品种材料选择及主要加工工艺要求列于表 7-10。

表 7-10　主要金具品种材料选择及主要加工工艺要求

序号	型号	名称	主要材料		主要加工工艺	
			寒冷地区	普通地区	寒冷地区	普通地区
1	DB-1080-200	调整板	Q235C	Q235A	板件切割	板件切割
2	DB-21120-180	调整板	Q345C	Q345B	板件切割	板件切割
3	GD-21	挂点金具	40Cr	35	锻造、正火处理	锻造
4	EB-12/16-100	耳轴挂板	40Cr	Q235A	锻造、正火处理	锻造
5	L-2145G	三角联板	Q345C	Q345B	板件切割	板件切割
6	P-21100	平行挂板	Q345C	Q345B	板件切割	板件切割
7	PQ-21100	牵引板	Q345C	Q345B	板件切割	板件切割
8	QP-1050	球头挂环	35CrMo	40	锻造、调质处理	锻造
9	QP-2180	球头挂环	35CrMo	40Cr	锻造、调质处理	锻造、调质处理

续表

序号	型号	名称	主要材料		主要加工工艺	
			寒冷地区	普通地区	寒冷地区	普通地区
10	U-1085	U 型挂环	40Cr	Q235A	锻压、正火处理	锻压
11	U-21100	U 型挂环	40Cr	35	锻压、正火处理	锻压
12	WS-1085	碗头挂板	40Cr	KTH330-08	锻造、正火处理	砂型锻造、退火处理
13	WS-21100	碗头挂板	40Cr	35	锻造、正火处理	锻造
14	Z-1080	直角挂板	Q235C	Q235A	冲压	冲压
15	Z-2190	直角挂板	Q345C	Q345B	板件切割、锻压	板件切割、锻压
16	XGF-5X	悬垂线夹	ZL102	ZL102	金属型锻造	金属型锻造
17	XF-8038	悬垂线夹	ZL104	ZL104	金属型锻造	金属型锻造
18	NY-800/550	耐张线夹	主体：1050A、3A21 钢锚：Q235C	主体：1050A、3A21 钢锚：Q235A	主体：挤压、拉拔、焊接 钢锚：锻造	主体：挤压、拉拔、焊接 钢锚：锻造
19	NY-465/210	耐张线夹	主体：1050A、6063 钢锚：Q235C	主体：1050A、6063 钢锚：Q235A	主体：挤压、拉拔、焊接 钢锚：锻造	主体：挤压、拉拔、焊接 钢锚：锻造
20	NY-630/45	耐张线夹	主体：1050A 钢锚：Q235C	主体：1050A 钢锚：Q235A	主体：挤压、拉拔、焊接 钢锚：锻造	主体：挤压、拉拔、焊接 钢锚：锻造
21	NY-425	耐张线夹	主体：6063 钢锚：Q235C	主体：6063 钢锚：Q235A	主体：挤压、拉拔、焊接 钢锚：锻造	主体：挤压、拉拔、焊接 钢锚：锻造

第二节　绝缘子串的组装

由于杆塔结构、绝缘子型式、导线型号、每相导线的根数及电压等级不同，输电线路上用的绝缘子串将有很多不同的组装形式。但归纳起来可分为悬垂组装及耐张组装两大类型。绝缘子串不论是悬垂还是耐张都是由几个分支组成，整个组装称为“串”，其中分支称为“联”。金具与绝缘子组装时，要确定绝缘子形式和联数；绝缘子本身的组装形式；绝缘子串与杆塔的连接形式；绝缘子串与导线的连接等。此外，还要正确选择金具零件的机械强度，金具零件间的尺寸配合、方向等。

一、绝缘子机械强度的安全系数

参照 GB 50545—2010《110kV～750kV 架空输电线路设计规范》、GB 50790—2013《±800kV 直流架空输电线路设计规范》、GB 50665—2011《1000kV 架空输电线路设计规范》和 DL 5497—2015《高压直流架空输电线路设计技术规程》的规定，绝缘子机械强度的安全系数，不应小于表 7-11 所列数值。

表 7-11　绝缘子机械强度的安全系数

情况	最大使用荷载		常年荷载	验算荷载	断线	断联
	盘形绝缘子	棒形绝缘子				
安全系数	2.7	3.0	4.0	1.5 （1.8）	1.8	1.5

注　1. 常年荷载是指年平均气温条件下绝缘子所承受的荷载。验算荷载是指验算条件下绝缘子所承受的荷载。
2. 棒形绝缘子包括复合绝缘子和瓷棒绝缘子。
3. 括号内为 GB 50790—2013《±800kV 直流架空输电线路设计规范》和 GB 50665—2011《1000kV 架空输电线路设计规范》规定值。

二、绝缘子串联数的确定

（一）悬垂绝缘子串

导线挂在直线杆塔上，悬垂绝缘子串应能承受导线等的全部荷载，其联数应按如下荷载计算并考虑相应的安全系数后进行选择确定。

（1）承受正常运行时作用在绝缘子串上的最大荷载；

（2）承受断线后作用在绝缘子串上的荷载；

（3）承受断联后作用在剩余完好联上的垂直荷载；

（4）承受验算条件下作用在绝缘子串上的最大荷载。

（二）耐张绝缘子串

导线挂在耐张杆塔上，耐张绝缘子串应能承受导线的全部张力，其联数应按如下荷载计算并考虑相应的安全系数后进行选择确定。

（1）承受作用在耐张绝缘子串上的最大张力；

（2）承受断线后作用在耐张串上的荷载；

（3）承受断联后作用在剩余完好联上的最大张力；

（4）承受验算条件下作用在耐张绝缘子串上的最大张力。

（三）金具的机械强度

悬垂和耐张绝缘子串确定后，对串中所有金具的机械强度应进行检查核定，并应满足如下安全系数：

（1）最大使用荷载情况，2.5；

（2）断线、断联情况，1.5。

（四）多联绝缘子串联间距的确定

经分析及试验验证，联间距是由绝缘子串的电气和机械性能决定的。

1. 电气性能对联间距的要求

根据科研单位对双联绝缘子串的污耐压试验结果分析，钟罩型绝缘子的双串并联净空间距大于200mm时，放电过程能独立发展，但双串并联增加了闪络概率，所以双串并联的污闪电压要比单串的低。建议多串并联的联间净距不宜低于200mm。

2. 机械性能对联间距的要求

当采用耐张（水平）或V串布置时，需考虑绝缘子串由于承受自重及风荷载，绝缘子串会产生类似弧垂的偏移，从而造成绝缘子的接近或碰撞。

以两联550kN绝缘子为例，其结构高度为240mm，盘径380mm，如果采用42片，绝缘子的估算长度要达到10m。可以按最严重的状态计算，即将绝缘子串假设为一根柔性的悬链线，荷载沿串长均匀分布，套用两侧等高的弧垂公式计算，计算最大偏移量约为20mm。考虑加上绝缘子盘径380mm，总计400mm。为保证此种组装型式绝缘子不会发生碰撞，联间距离不小于400mm。对于重冰区及易舞区，可适当增加联间距。

3. 重冰区对联间距的要求

重冰区易发生脱冰跳跃情况，且随着覆冰厚度的增加，跳跃幅度增加。导线脱冰跳跃后，牵动绝缘子串剧烈抖动，摆动幅度较一般线路大，若联间距过小将导致联间绝缘子相互碰撞，造成裙边受损。建议重冰区应适当加大联间距以减少脱冰跳跃引起的绝缘子发生碰撞的概率。

4. 易舞区对联间距的要求

由于舞动时造成双联或多联绝缘子串的不规则摆动，易发生联间碰撞，造成瓷或玻璃绝缘子的损坏。因此，可适当增加双联或多联绝缘子联间距离。

三、挂线点的选择

杆塔上悬挂导线和地线的部位称为挂线点。选择挂线点时，必须将与其连接的金具包括在内，两者应一并考虑。挂线点受力较为复杂，在任何情况下都应保证有足够的机械强度。为了减少或消除挂线点处的弯曲应力，要求与挂线点连接的金具，应能随实际受力方向的改变而灵活转动。由于杆塔的形式和绝缘子串的种类较多，挂线点亦有不同的形式和种类，但归纳起来可分为悬垂、耐张两类。根据多年的运行经验，推荐如下几种常用的挂线点方式。

（一）悬垂挂线点

图7-14（a）所示适用于方横担一点悬挂或两点悬挂。当平行线路方向受力，U型挂板可以转动；垂直线路方向受力，球头挂环可以转动。由于这种挂线方式受力条件较好，在输电线路中得到普遍采用。

图7-14（b）所示系采用普通U型螺栓，适用于杆塔尖横担结构。采用这种挂线方式，挂线点结构简单，安装方便。平行和垂直线路方向受力，U型挂环均能自由转动，受力条件较好，尤其适合于悬挂地线。但是，这种挂线方式的U型螺栓直接承受轴向及纵横两

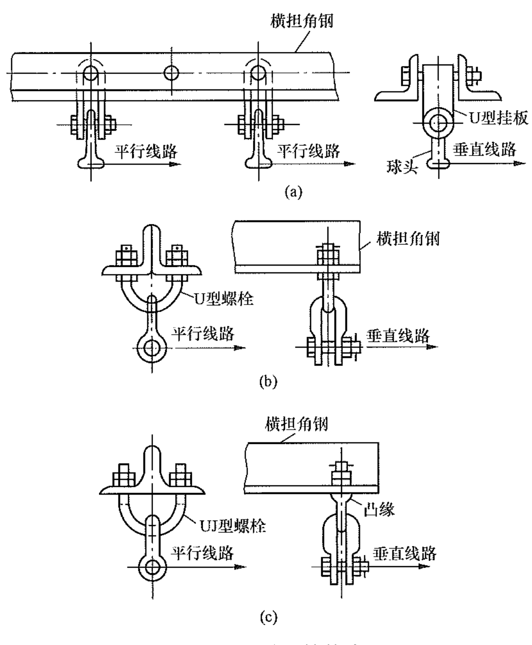


图7-14 悬垂挂线点

（a）横担一点悬挂或两点悬挂；（b）杆塔尖横担结构；（c）UJ型螺栓，概部增加一凸缘

方面的荷载，因此要求螺栓部分加工必须保证质量。此外，由于普通U型螺栓在垂直线路方向允许的荷载较小，限制了使用范围。之后又增加一种叫UJ型的螺栓，见图7-14（c）。UJ型螺栓，其根部增加一凸缘，借以增大垂直线路方向的抗弯荷载。在工程设计中应根据实际荷载在两种U型螺栓中挑选。

超高压、特高压输电线路由于导线分裂根数多，荷载大，近年来悬垂串主要采用耳轴挂板（见图7-15）作为联塔金具，这种联塔金具采用整锻工艺，有很好的稳定性，避免了金具受力不合理的连接组合，提高了线路运行安全性。

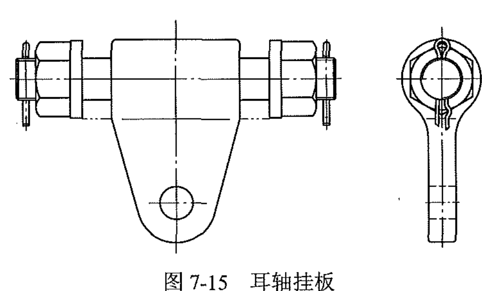


图7-15 耳轴挂板

（二）耐张挂线点

常用的耐张挂线点的连接方式，图7-16（a）适用于一点悬挂，图7-16（b）适用于两点悬挂。由于这两种挂线方式上下（用绝缘子串中的第二个金具零件）、左右都能自由转动，适应了导线倾斜角和线路转角的变化。它不仅适用悬挂导线，也适用于悬挂地线。

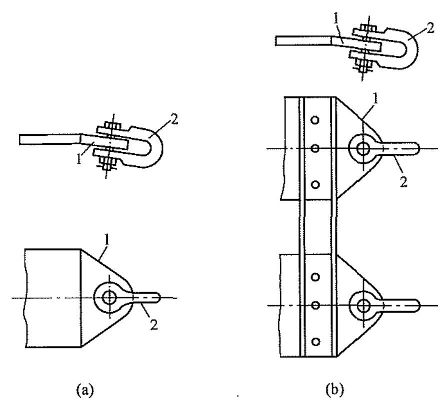


图7-16 耐张挂线点

（a）单挂点；（b）双挂点

1—杆塔挂线板；2—U型挂环

超高压、特高压输电线路由于导线分裂根数多，荷载和张力大，近年来耐张串主要采用GD挂板（见图7-17）作为联塔金具，这种联塔金具采用整锻工艺，有很好的稳定性，避免了金具受力不合理的连接组合，提高了线路运行安全性。GD挂板最大限度地缩小了顺线和横线两个方向转动点之间的距离，从而大大提高了联塔金具的可靠性，但它需要在组装杆塔时就要将它们安装好，使杆塔横担结构变得相对复杂，螺栓和本体连为一体，安装制造不太方便。

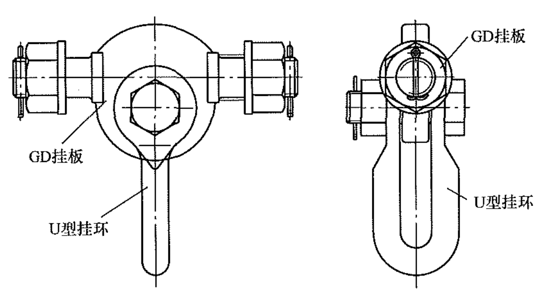


图7-17 GD挂板

四、金具组装应注意的事项

（一）金具零件连接接触点的选择

在金具零件的互相连接时，应尽量避免点接触，以防止应力集中。两零件间若采用螺栓连接，还应避免因开裆过大而使螺栓受到不必要的弯矩。图7-18列举了正确与错误的连接方式，供选用时参考。

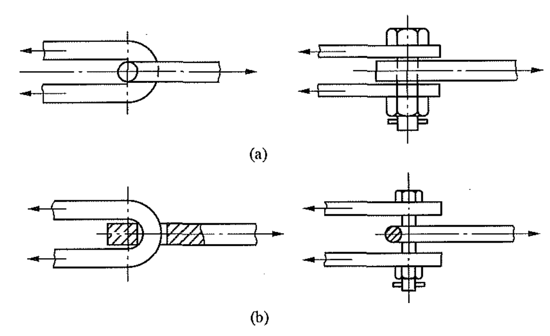


图7-18 金具零件连接接触点

（a）正确连接；（b）错误连接

（二）其他注意事项

与横担连接的第一个金具应转动灵活且受力合理，其强度应较串内其他金具强度适当提高。

金具零件与绝缘子连接时应注意相应的连接标记，保证可靠连接。

五、V型绝缘子串的组装形式和受力计算

V型绝缘子串的组装形式，见图7-19。采用V型组装的目的是限制绝缘子串摇摆，以减小塔头尺寸及线路走廊宽度。V型绝缘子串一般用在酒杯型、门型、猫头型等塔型的中相导线上。用于边导线时，边导线横担要加长，所以需全面进行经济技术比较。这一措施也适用于旧线路改造或升压运行。

V型绝缘子串与塔的连接方式，应能保证在断线

时平行线路方向灵活转动。在导线最大风偏时，应能避免绝缘子串受压松弛，以防绝缘子脱落或受压损坏。

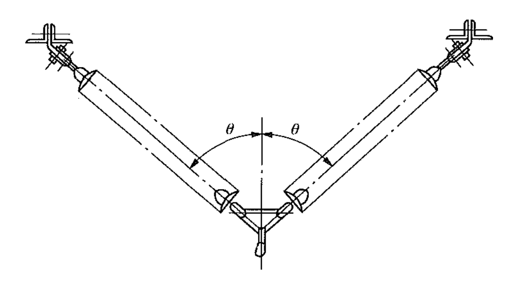


图 7-19　V 型绝缘子串

绝缘子串是否受压松弛，取决于 V 型绝缘子串的夹角，即 V 型联板的夹角 θ，如图 7-20 所示，夹角 θ 与风偏角 φ 有关，其计算公式为

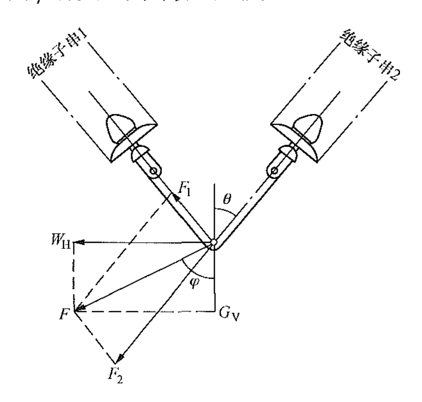


图 7-20　V 型绝缘子串受力分析图

$$\left.\begin{aligned} F &= \sqrt{W_H^2 + G_V^2} \\ F_1 &= \frac{\sin(\varphi-\theta)}{\sin 2\theta}F \\ F_2 &= \frac{\sin(\varphi+\theta)}{\sin 2\theta}F \end{aligned}\right\} \tag{7-5}$$

式中　F——最大风时导线的综合荷载，N；

W_H——导线最大风荷载，$W_H = l_H g_4$，N；

G_V——导线自重荷载，$G_V = l_V g_1$，N；

F_1——F 在绝缘子串 1 上的分力，N；

F_2——F 在绝缘子串 2 上的分力，N；

l_H、l_V——导线的水平和垂直档距，m；

g_1、g_4——导线单位长度自重荷载和最大风荷载，N/m；

φ——导线最大风偏角，$\varphi = \arctan\frac{W_H}{G_V}$，(°)；

θ——V 型绝缘子串夹角之半，(°)。

表 7-12 列出当 φ 与 θ 成一定关系时，作用在两绝缘子串上的分力 F_1 和 F_2 的数值，以表示绝缘子串受拉或受压的情况。

表 7-12　V 型绝缘子串受力分析

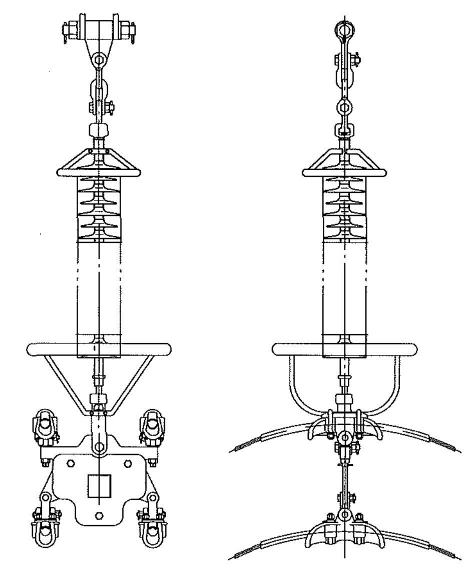
φ 与 θ 的关系	F_1	F_2	绝缘子串受力情况
$\varphi=0$	$F_1=\frac{-\sin\theta}{\sin 2\theta}$	$F_2=\frac{\sin\theta}{\sin 2\theta}$	两个绝缘子串均受拉
$\varphi=\theta$	0	F	绝缘子串 1 不受力，绝缘子串 2 受全部综合荷载 F
$\varphi>\theta$			绝缘子串 1 受压，绝缘子串 2 受拉

由表 7-12 的分析可知，V 型绝缘子串的夹角 θ 越大，可适应的导线最大风偏角 φ 越大。但是，θ 角愈大绝缘子受力愈增加。V 型绝缘子串夹角的计算原则是输电线路悬垂 V 型串两肢之间夹角的一半可比最大风偏角小 5°～10°，或通过试验确定。

六、导线悬垂串的组装

（一）单联悬垂串的组装

单联 I 型悬垂串的组装，见图 7-21；单联 V 型悬垂串的组装，见图 7-22。


图 7-21　单联 I 型悬垂串组装图

（二）双联悬垂串的组装

双联 I 型悬垂串的组装，如图 7-23 所示；双联 V 型悬垂串的组装，如图 7-24 所示。

（三）三联悬垂串的组装

三联 I 型悬垂串的组装，见图 7-25；三联 V 型悬垂串的组装，见图 7-26。

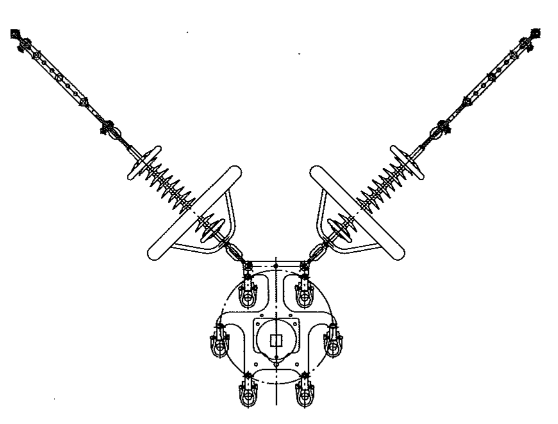


图 7-22 单联 V 型悬垂串组装图

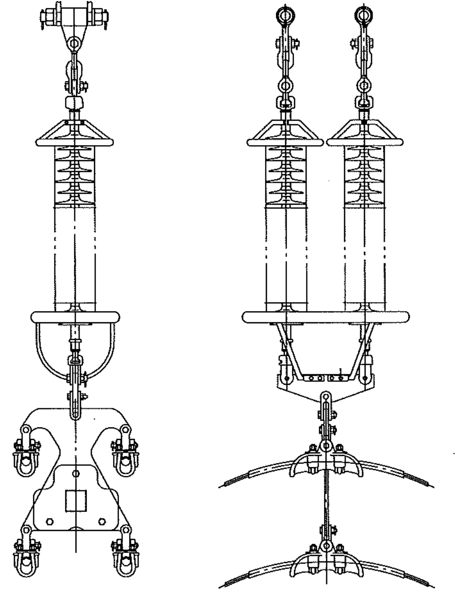


图 7-23 双联 I 型悬垂串组装图

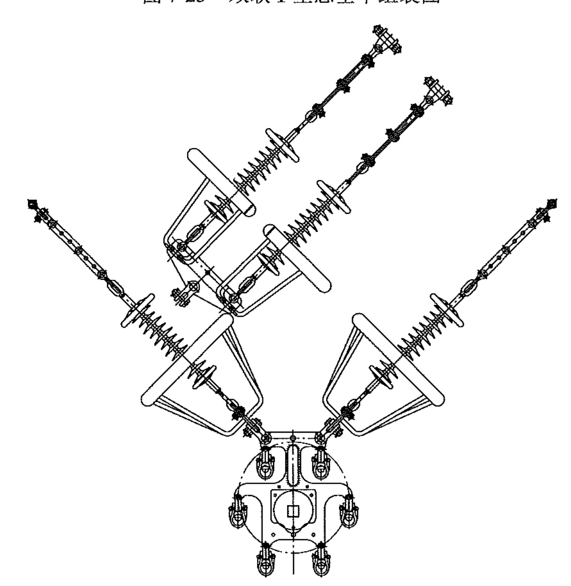


图 7-24 双联 V 型悬垂串组装图

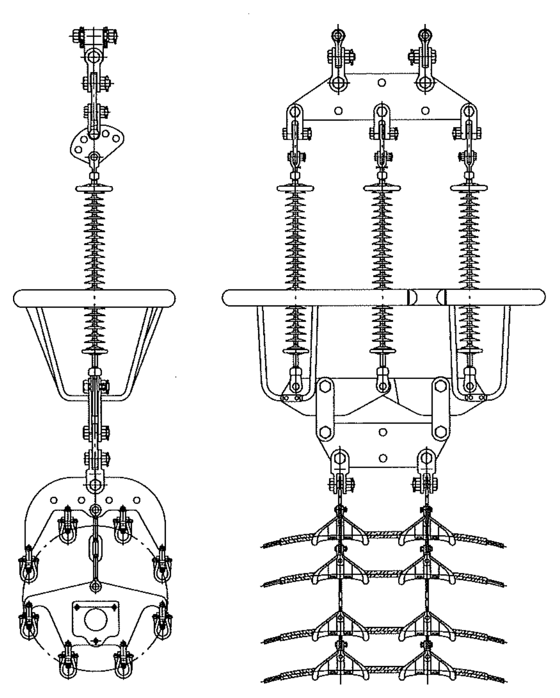


图 7-25 三联 I 型悬垂串组装图

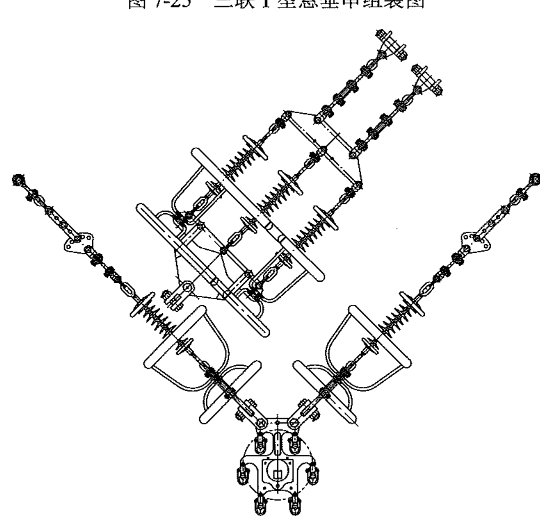


图 7-26 三联 V 型悬垂串组装图

七、导线耐张串的组装

(一) 单联耐张串的组装

单联耐张串的组装如图 7-27 所示。

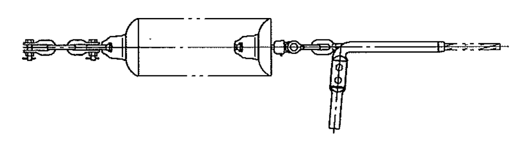


图 7-27 单联耐张串组装图

(二) 双联耐张串的组装

双联耐张串的组装，如图 7-28 所示。

（三）三联耐张串的组装

三联耐张串的组装如图 7-29 所示。

（四）四联耐张串的组装

四联耐张串的组装如图 7-30 所示。

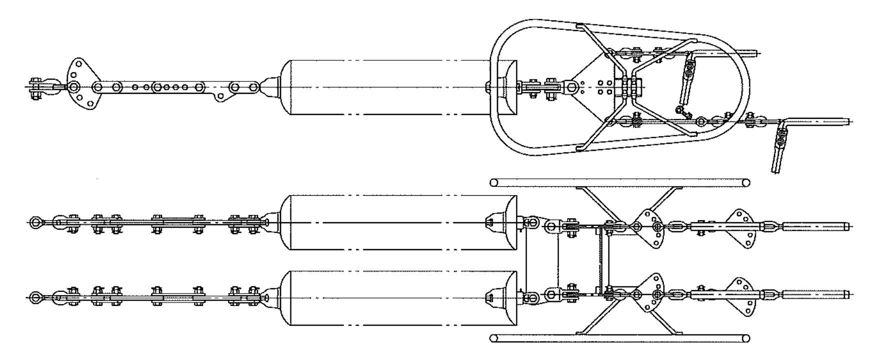
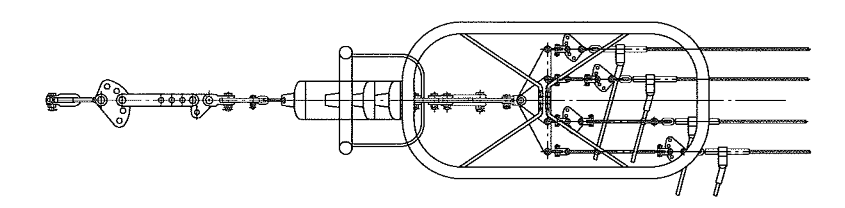


图 7-28 双联耐张串组装图



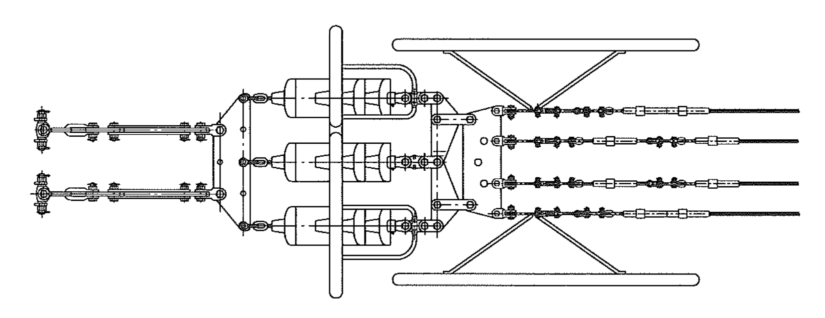


图 7-29 三联耐张串组装图

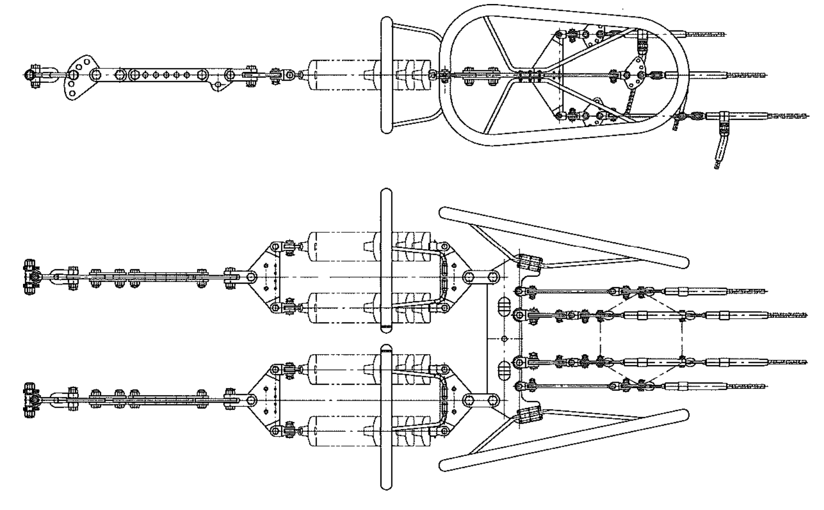


图 7-30 四联耐张串组装图

八、导线跳线串的组装

（一）软跳线的组装

软跳线的组装如图 7-31 和图 7-32 所示。

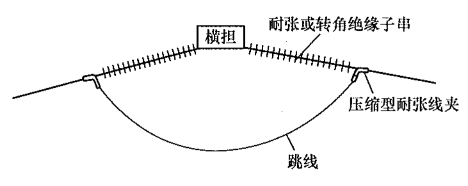


图 7-31　软跳线组装图

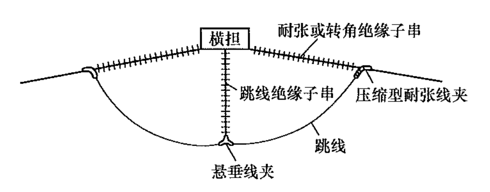


图 7-32　软跳线组装图（加装跳线绝缘子串）

（二）硬跳线的组装

硬跳线的组装如图 7-33 和图 7-34 所示。

图 7-33　硬跳线组装图（Ⅰ型串）

图 7-34　硬跳线组装图（V 型串）

九、导线换位塔用绝缘子串的组装

（一）导线换位塔用耐张串的组装

导线换位塔用耐张串的组装如图 7-35 和图 7-36 所示。

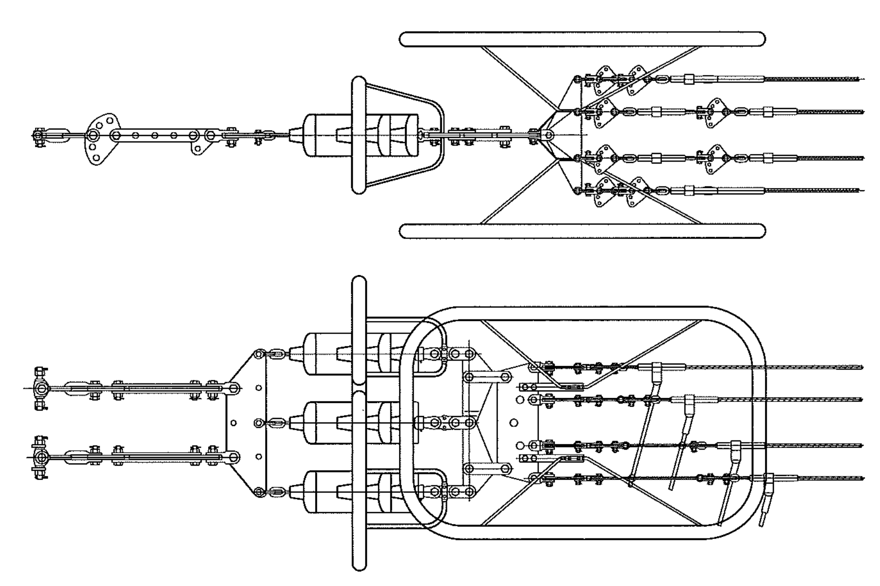
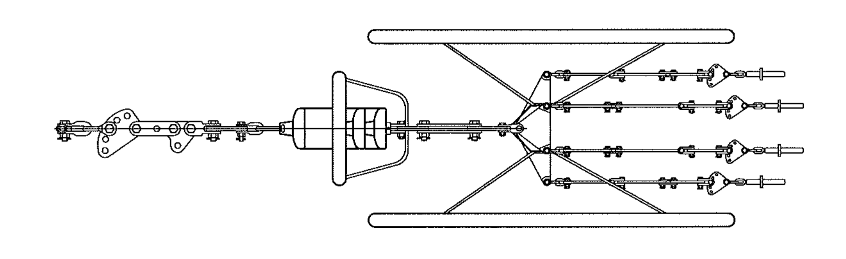


图 7-35　导线换位塔用耐张串组装图（1）



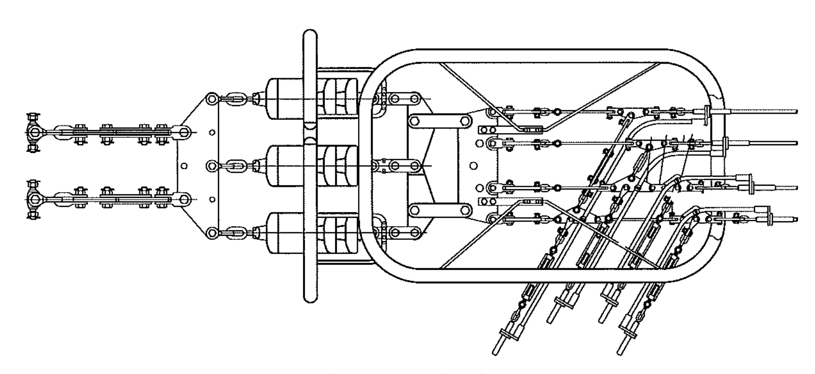


图 7-36　导线换位塔用耐张串组装图（2）

（二）导线换位塔用牵引串的组装

导线换位塔用牵引串的组装如图 7-37～图 7-39 所示。

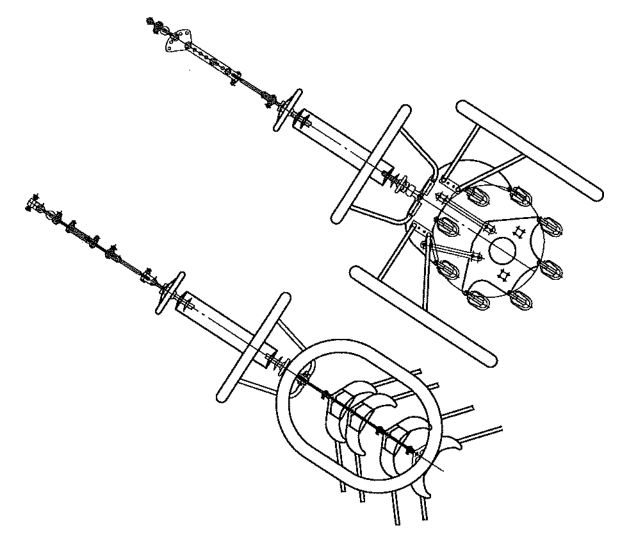


图 7-37 导线换位塔用牵引串组装图（1）

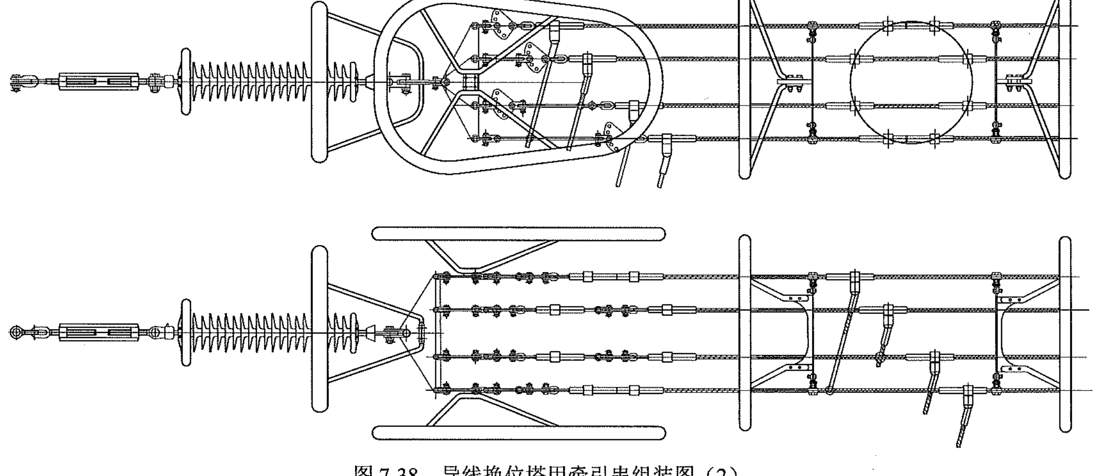


图 7-38 导线换位塔用牵引串组装图（2）

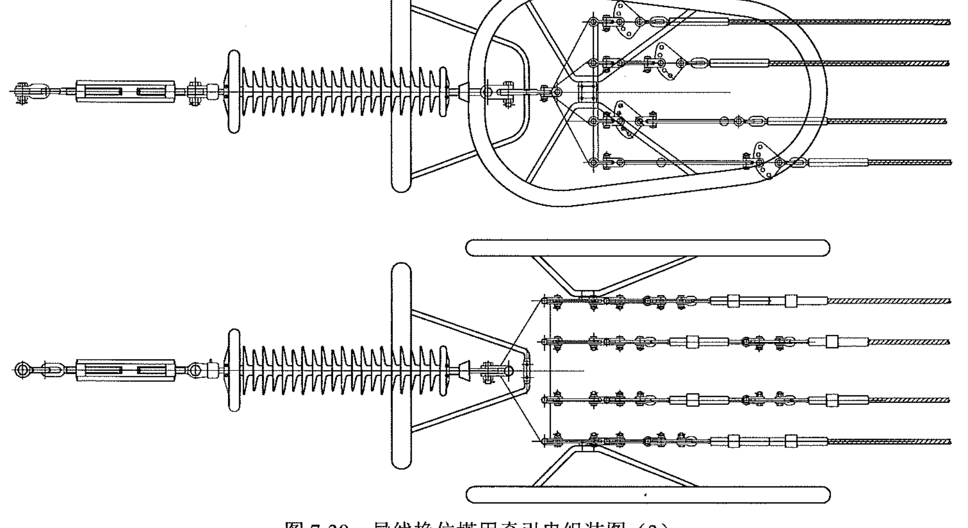


图 7-39 导线换位塔用牵引串组装图（3）

十、地线悬垂串的组装

（一）单联地线悬垂串的组装

单联地线悬垂串的组装如图 7-40 所示。

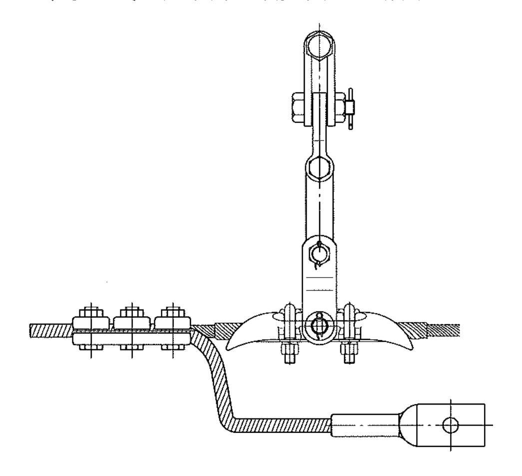


图 7-40　单联地线悬垂串组装图（接地型）

（二）双联地线悬垂串的组装

双联地线悬垂串的组装如图 7-41～图 7-43 所示。

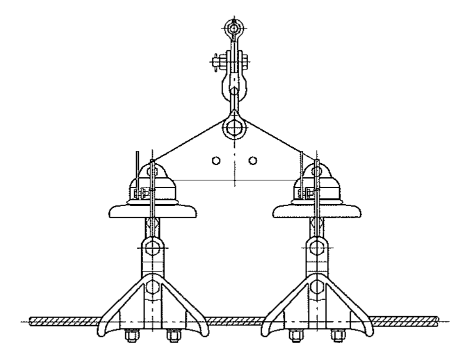


图 7-41　双联地线悬垂串组装图（绝缘型）

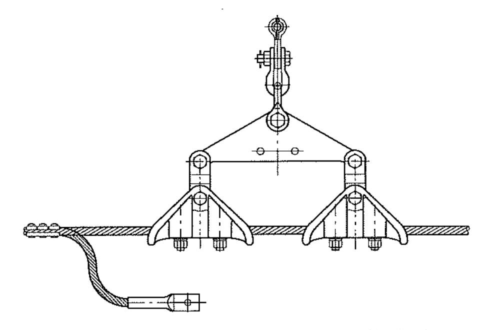


图 7-42　双联地线悬垂串组装图（接地型）

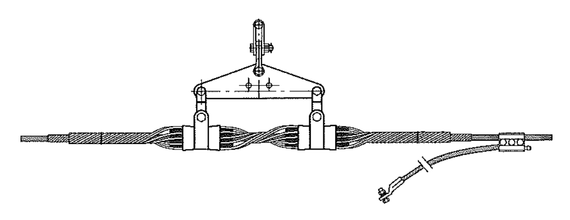


图 7-43　双联 OPGW 悬垂串组装图

十一、地线耐张串的组装

（一）单联地线耐张串的组装

单联地线耐张串的组装如图 7-44 和图 7-45 所示。

（二）双联地线耐张串的组装

双联地线耐张串的组装如图 7-46 和图 7-47 所示。

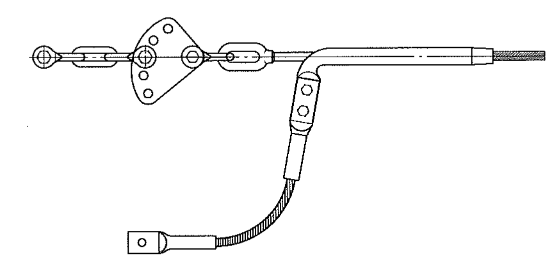


图 7-44　单联地线耐张串组装图（接地型）

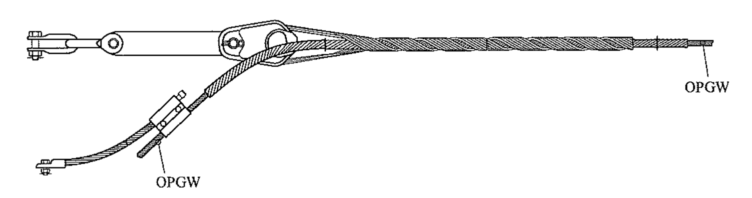


图 7-45　OPGW 用耐张串组装图

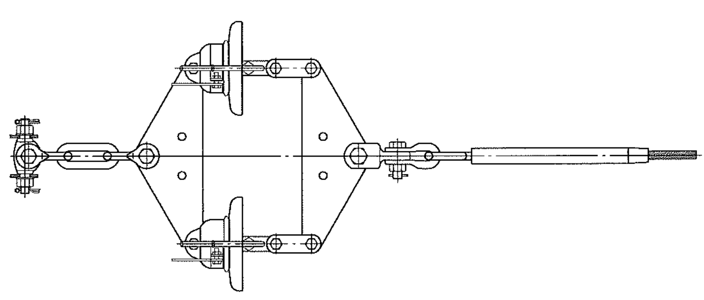


图 7-46　双联地线耐张串组装图（绝缘型）

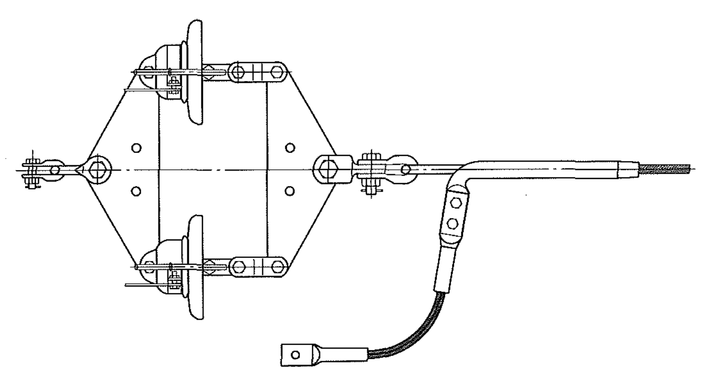


图 7-47 双联地线耐张串组装图（构架用）

第三节 接 续 金 具

接续金具用于架空输电线路的导线或地线接续，承受导线或地线全部张力和部分张力的接续，也用于导线或地线断股的补修。

根据结构形状和施工方法的不同，接续金具可分为液压接续金具、钳压接续金具、爆压接续金具、螺栓接续金具及预绞式接续金具等五类。

一、液压接续金具

采用液压方法接续导线或地线时，用液压机和压缩钢模进行，接续管在受压后产生塑性变形，使接续管与导线或地线成为一个整体。因此液压接续有足够的机械强度，并且有良好的电气接触性能。

接续管形状主要有两种：一种压缩前为圆形，压缩后的形状为正六角形或扁六角形；另一种压缩前为椭圆形，压缩后为圆形。其中前者具有施工方便、压力均匀、省材料等优点。

液压接续分为钢芯对接与钢芯搭接两种接续方法。钢芯对接是一般常规的接续方法；而钢芯搭接是近年来采用较多的接续方法，其优点为缩短了接续管长度和减少压缩工作量。钢芯搭接液压接续时应先将散股的钢芯端头放入薄壁无缝钢管中搭接，之后填充两根单股钢丝进行液压，压缩方法与常规液压方法相同。架空输电线路上导线和地线常用的接续管如图 7-48 所示。

二、钳压接续金具

钳压接续将导线端头搭接在薄壁的椭圆形管内，以机动钳或液压钳进行钳压。

钳压接续管通常只适用于中小截面的钢芯铝绞线、铝绞线、铜绞线和铁线。钳压接续时，应将接续管置于重叠的两线端之间，按规定程序顺序交错进行，钳压部位凹槽的深度必须符合安装规定，以保证握力符合要求。常用的钳压接续管如图 7-49 所示。

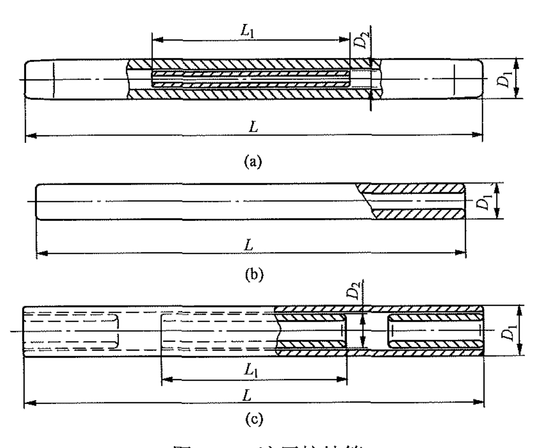


图 7-48 液压接续管

（a）类型一；（b）类型二；（c）类型三

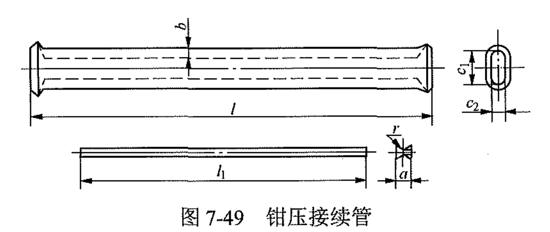


图 7-49 钳压接续管

三、爆压接续金具

与液压接续相比，爆压接续不用搬运笨重的液压工具，效率高，因而适用于山区输电线路的架设。

为保证爆压接续的质量，应严格按爆压操作规程进行施工。椭圆形爆压接续管一般用于中小截面的钢芯铝绞线和铝绞线；而大截面钢芯铝绞线主要采用圆形爆压接续管。

常用的圆形爆压接续管如图 7-50 所示。

四、螺栓接续金具

导线和地线用螺栓接续仅适用于不承受张力的部位，其电气性能依靠螺栓压力来保证。因此，螺栓接续需要加强定期维护。

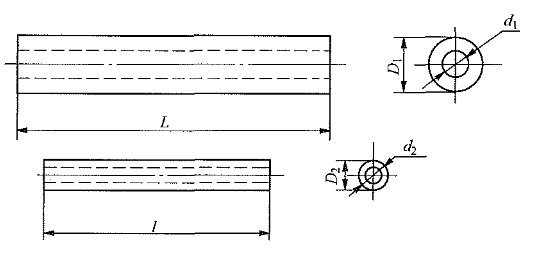


图 7-50　圆形爆压接续管

架空输电线路上导线和地线常用的螺栓接续金具有并沟线夹（见图 7-51）、钢线卡子（见图 7-52）等。

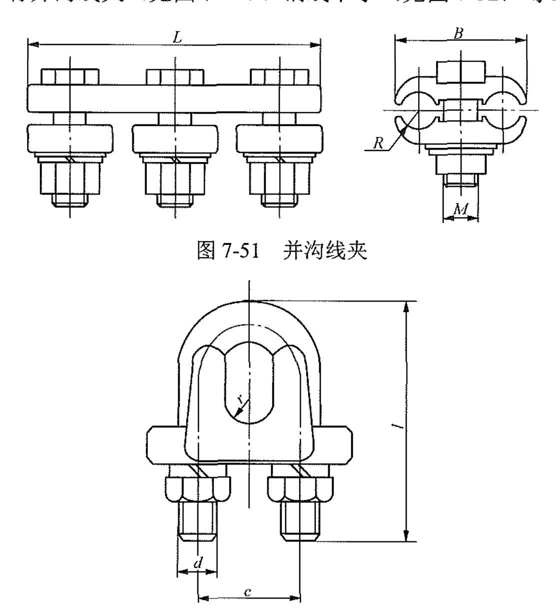


图 7-51　并沟线夹

图 7-52　钢线卡子

五、预绞式接续金具

架空输电线路上导线和地线常用的预绞丝接续金具主要为预绞式接续条（见图 7-53）等。

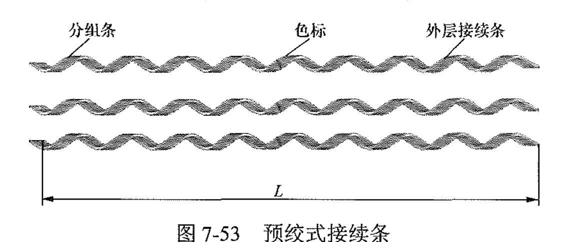


图 7-53　预绞式接续条

六、导线补修用接续金具

架空输电线路在施工和运行过程中，如发生导线外层铝股磨损、折断，以及由于外力损伤等而产生的断股现象，应及时给予适当的导线补修处理，避免散股的继续扩大而导致机械强度的降低。

常用的补修用接续金具主要有压缩型补修管和预绞丝补修条等。

采用压缩型补修管有较好的补强效果，压缩后握力不低于导线或地线计算拉断力的 90%。压缩型补修管如图 7-54 所示。

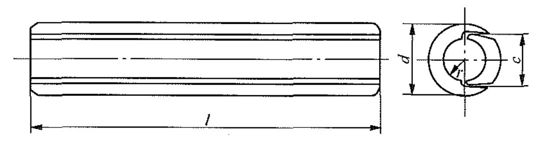


图 7-54　压缩型补修管

预绞丝补修条是以铝合金预制成形的富有弹性的螺旋状单丝，安装时不需任何工具，拆卸下的预绞丝仍可重新利用。但这种补修条仅能用于断股 7%及以下损伤范围不大的线段上，可使断股范围不致扩大，但达不到补强效果。预绞丝补修条如图 7-55 所示。

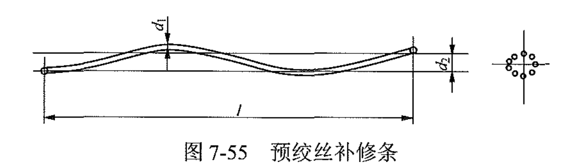


图 7-55　预绞丝补修条

第四节　保　护　金　具

保护金具是用于导、地线机械防护及绝缘子电气防护的金具。其中机械保护金具包括防振锤、间隔棒、悬重锤、护线条、铝包带等；电气保护金具有均压环与屏蔽环等。

一、防振锤

防振锤是消除导、地线振动的金具，由高强度镀锌钢绞线、线夹以及一定质量的重锤组成。防振锤的消振性能与其有效工作频率范围相关。当导、地线发生振动时，导地线上的防振锤会产生相对运动，从而吸收导地线的振动能量，消除和降低导地线的振动。可供使用的防振锤型式很多，各种防振锤根据结构、重量和几何尺寸不同，均具有一定的固有频率。

有关防振锤的描述见第五章第六节。

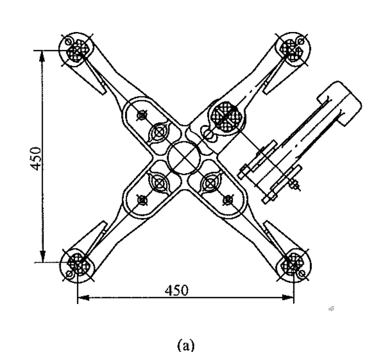
二、间隔棒

（一）用途、分类及适用范围

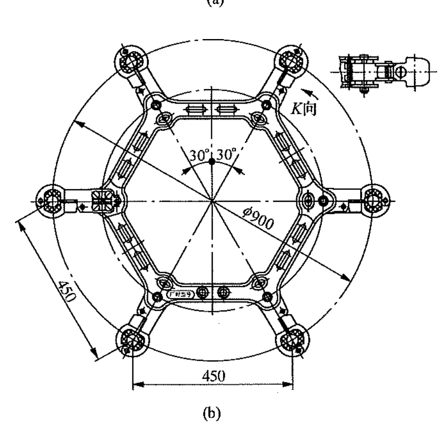
输电线路分裂导线间隔棒的主要用途是限制子导线之间的相对运动及在正常运行情况下保持分裂导线的几何形状。

按输电线路分裂导线的根数不同，我国输电线路的导线间隔棒，目前可分为二、三、四、六、八根分裂导线用的五种类型。按间隔棒的工作特性大体可分为两类，即阻尼型间隔棒（见图 7-56）及非阻尼型间

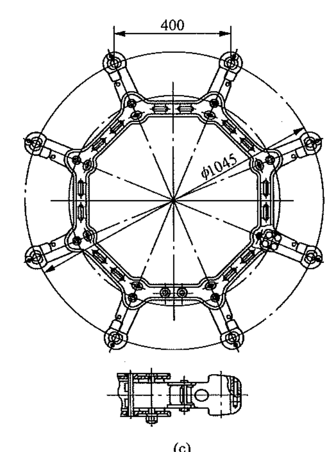
隔棒（见图 7-57）。阻尼型间隔棒的特点是：在间隔棒活动关节处利用橡胶作阻尼材料来消耗导线的振动能量，对导线振动产生阻尼作用。因此，该类间隔棒可适用于各地区。但是，考虑到输电线路的经济性，该类间隔棒重点是用于导线容易产生振动地区的线路（如平原、丘陵及一切开阔地带）。非阻尼型间隔棒的消振性能较差，可适用于导线不易产生振动地区的线路（如山地、林区的隐蔽地带）或用作跳线间隔棒。



(a)



(b)



(c)

图 7-56 阻尼型间隔棒
（a）四分裂间隔棒；（b）六分裂间隔棒；（c）八分裂间隔棒

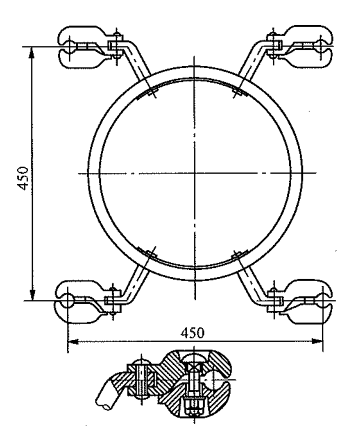


图 7-57 非阻尼型间隔棒

（二）技术要求

1. 耐短路电流向心压力的机械强度

输电线路发生短路事故时，分裂导线受电磁作用将产生较大的向心压力，间隔棒的各部件应在经受这一压力时不发生破坏或永久变形。

间隔棒的向心力可计算为

$$F=1.566\times\frac{2}{n}\sqrt{n-1}I_{sc}\sqrt{T_{br}\lg\frac{s}{d}}=3.132\frac{I_{sc}}{n}\sqrt{(n-1)T_{br}\lg\frac{s}{d}} \tag{7-6}$$

式中 F——短路电流向心力，N；
n——分裂导线根数；
I_{sc}——系统可能出现的最大短路电流，kA；
T_{br}——子导线张力，N；
s——分裂导线间距，m；
d——子导线直径，m。

2. 两夹头之间的拉、压强度

分裂导线间隔棒的机械强度应能承受导线覆冰不平衡张力（如仅单根导线覆冰）、次档距振荡及单根导线上人时在子导线之间产生的拉、压力。考虑到可能出现的严重情况，一般该强度应不低于 4000N。

3. 夹头握力

输电线路不仅要求在正常运行或导线在微风振动情况下，间隔棒对导线有稳固的握力，以防止磨损导线。而且还要求由于不均匀覆冰等原因使导线发生扭转时，间隔棒夹头应能握住导线，以保证外力消除（如覆冰脱落）后，导线能有自行恢复到原位置的能力。恢复力矩有两个来源，即 $M=M_1+M_2$，M_1 是因夹头偏离其平衡位置后，由两侧张力合成的结果。这个力矩可近似地表述为

$$M_1=-2n\times\frac{T_{br}}{L}r^2\sin\beta\ \ (0\leqslant\beta\leqslant\pi) \tag{7-7}$$

式中 n——分裂导线根数；
T_{br}——子导线张力，N；

L——次档距长度（即两间隔棒之间的长度），m；

r——间隔棒分裂半径，m；

β——间隔棒的扭转角度，(°)。

从式（7-7）可以看出，当 β 角小于 180°时 M_1 为负，即为恢复力矩。当 $\beta=90°$时，M_1 达到最大值，当 β 逐渐接近 180°时 M_1 趋近于零。进一步增大扭转角 β（$\beta>180°$），分裂导线开始扭绞到一起，式（7-7）的误差也将变得过大。扭转角在 180°～270°之间时 M_1 不再是恢复力矩，这时使导线复位只有依靠 M_2。

M_2 来源于子导线的抗扭刚度，并随 β 的增加而增大，方向与 β 增加的方向相反，即永为负值。M_2 这一部分力矩与间隔棒的扭握力有关，一旦扭握力不足，子导线与夹头之间将有相对转动，就不能被充分利用。夹头扭握力本身并不能提供额外的恢复力矩，只能保证子导线抗扭刚度的充分发挥。

国外资料及国内实测结果表明，在长期运行情况下，铝截面积为 300mm² 的钢芯铝绞线，间隔棒夹头扭握力不应低于 25～30N·m，铝截面积为 400mm² 的钢芯铝绞线，间隔棒夹头扭握力不应低于 35～40N·m，铝截面积大于 400mm² 的钢芯铝绞线，间隔棒夹头扭握力不应低于 45N·m。

值得注意的是，上述扭握力数值是在长期运行情况下必须保证的。由于夹头的防松型式不同，各类夹头初始扭握力的标准也不一样。因此，夹头初始扭握力的数值应根据各类夹头可能使导线产生的最大径向蠕变及防松方式等因素综合确定。

4. 活动性

间隔棒应具有充分的活动性，以避免由于导线的振动、振荡、弛度差及不均匀覆冰时，夹头附近的导线出现高应力疲劳损坏。

5. 电气性能

间隔棒应符合线路金具防电晕及无线电干扰的要求。此外，对采用橡胶做阻尼元件或做夹头防松件的间隔棒而言，橡胶应具有一定的导电性能，以防止在子导线之间的不平衡电压作用下橡胶元件发热损坏。

（三）安装距离

如何合理地选择间隔棒的安装位置，仍然是一个正在探索中的问题。但是，目前国内外已广泛采用按不等距安装的方式。参考厂家所推荐的安装距离，初步拟定下述几项原则：

（1）第一次档距对第二次档距（或倒第一对倒第二次档距）的比值宜选在 0.55～0.65 左右。此外，间隔棒不宜布置成对于档距中央呈对称分布。

（2）端次档距长度，对阻尼性能良好的间隔棒可选在 30～45m 范围内，对阻尼性能一般或非阻尼型间隔棒可选在 25～35m 范围内。

（3）最大次档距长度，对阻尼性能良好的间隔棒，一般不宜超过 80～90m，对阻尼性能一般或非阻尼型间隔棒一般不宜超过 60～65m。

（4）对于特高压线路，由于分裂导线多为 6～8 根，为更好地固定导线的几何形状，防止导线扭转，最大次档距长度一般取 50～60m。

三、均压环与屏蔽环

1. 均压环

由于超高压、特高压线路中绝缘子串的绝缘子片数很多，每片绝缘子上的电压分布不均，靠近导线的高压侧绝缘子承受了极高的电压，导致高压侧绝缘子劣化率很高。而在绝缘子串上加装均压环则可以改善绝缘子串中绝缘子的电压分布。均压环应能避免金具起晕，并且自身不得起晕。常见的均压环形状如图 7-58、图 7-59 所示。

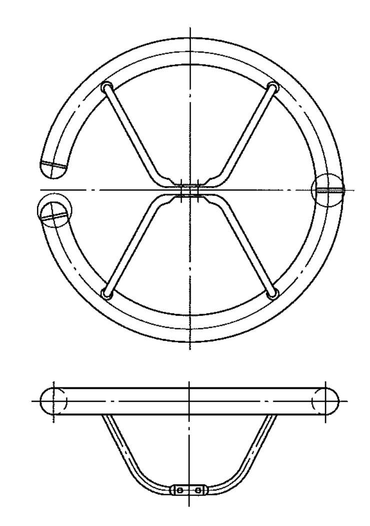


图 7-58 单联悬垂均压环

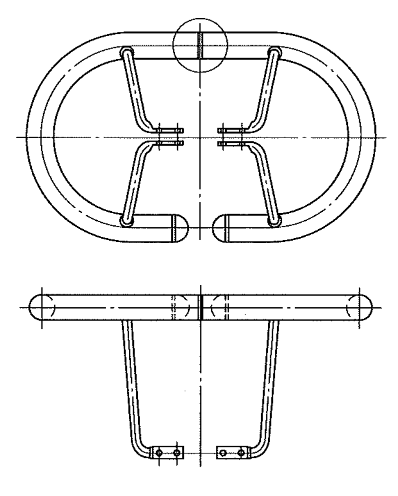


图 7-59 双联悬垂均压环

安装均压环时，其环的边缘在第一片绝缘子瓷裙以上或等高线上，一般安装在距第一片绝缘子瓷裙75～100mm 处。均压环的边缘至绝缘子裙边距离为150～250mm，以避免第一片绝缘子附件早期出现电晕。特高压交直流工程上选用时均应通过试验来确定最佳尺寸。

（1）早期输电线路中均压环采用的材料主要为圆钢管，现在基本上已全部采用铝圆管。

（2）以往工程中采用的均压环大多是闭口环，在施工紧线、附件安装时，容易被碰伤。现在部分工程已改为开口式均压环，可在紧线后、附件安装后再装均压环。

2. 屏蔽环

由于 330kV 以上电压等级输电线路的电压很高，当导线和金具表面的电位梯度大于临界值时，就会产生电晕放电现象。这种现象不仅消耗一定的电量，还会产生无线电干扰。

屏蔽环是使被屏蔽范围内不出现电晕现象的环状金具。其作用是保护金具，控制金具上的电晕。加装屏蔽环后，形成了均匀电场，能有效避免电晕放电。

屏蔽环的形状如图 7-60 所示。

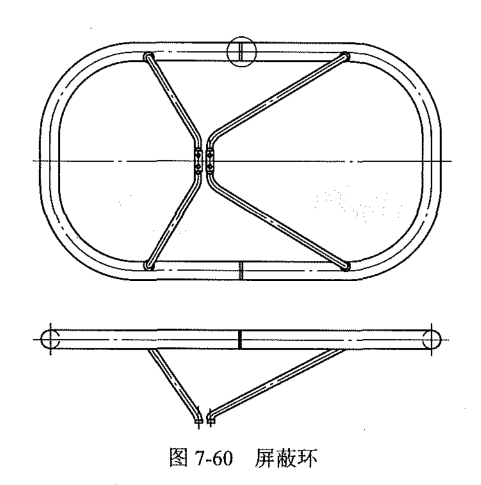


图 7-60　屏蔽环

3. 均压屏蔽环

均压屏蔽环是兼有均压和屏蔽作用的环状金具。即用一个环兼作均压环和屏蔽环，称为均压屏蔽环。

我国第一条 330kV 线路开始采用均压屏蔽环，随后 500、660、750、±800kV 及 1000kV 工程也大量采用均压屏蔽环。从大量工程运行情况看，均压屏蔽环运行情况良好。

均压屏蔽环的特点是一侧要作为均压环保护耐张绝缘子串，而另一侧要保护到耐张线夹引流线，环的支撑点布置在耐张串的联板上。均压屏蔽环的形状如图 7-61 所示。

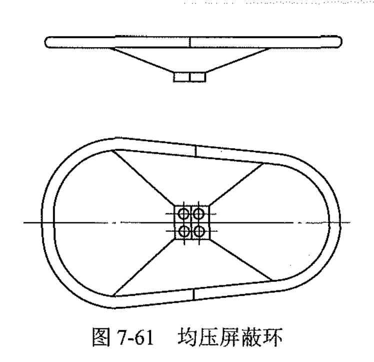


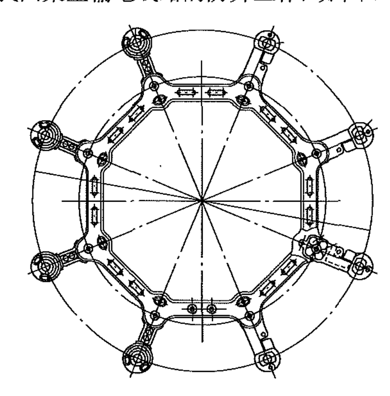
图 7-61　均压屏蔽环

四、防舞金具

舞动是输电线路导线发生不均匀覆冰后，在风的激励下产生的一种低频、大振幅的自激振动。舞动是威胁输电线路运行安全的主要因素之一，轻者会引起线路闪络、跳闸，重者会发生金具绝缘子损坏，导线断股、断线，铁塔螺栓松脱，甚至倒塔。因此对处于舞动区的线路开展防舞设计，会起到事半功倍的效果，经济和社会效益显著。目前，在我国应用的防舞装置主要有线夹回转式间隔棒、相间间隔棒、双摆防舞器、失谐摆和偏心重锤等。

1. 线夹回转式间隔棒

线夹回转式间隔棒（适用于分裂导线）是近年来我国新研制的一种防舞装置。其特点是间隔棒部分线夹可自由（或在一定角度范围内）回转，部分线夹与普通夹头相同，不能自由活动。活动夹头部分可以改变覆冰导线的覆冰形状，从而改变了覆冰导线的空气动力系数。因此这种防舞装置兼具间隔棒和防舞器的双重作用，且不会额外增加输电线路的集中荷载，对线路的运行应力基本没有影响。其布置方式主要考虑次档距振荡、翻转自恢复等的影响。线夹回转式间隔棒已经大量应用于我国架空输电线路的防舞工作，如图 7-62 所示。



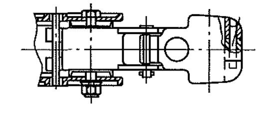


图 7-62　线夹回转式间隔棒

2. 相间间隔棒

相间间隔棒（单导线、分裂导线均可）是在相间或回路之间使用的一种具有绝缘性能和机械强度的间隔棒，它将各导线机械地连接起来，使各导线的运动相互制约，以达到抑制舞动的目的。相间间隔棒是由玻璃钢芯棒和硅橡胶护套构成的复合绝缘结构。它具有抗拉强度高、质量轻、并具有一定柔韧性；抗撞击性好，不破碎；耐污闪电压高等特点。相间间隔棒如图 7-63 所示。

相间间隔棒既可抑制舞动，又可防止脱冰跳跃，还可一定程度上防止风偏，其防舞功能是现有各类防舞器中效果较好的。相间间隔棒已广泛应用于 220kV 及以下电压等级的输电线路的防舞工作中，对于 220kV 以上电压等级的紧凑型输电线路也越来越多地采用相间间隔棒进行防舞，相间间隔棒最适合应用于相导线为垂直排列的同塔多回线路的防舞。当然相间间隔棒存在劣化、抗弯刚度小等问题，其使用寿命有待检验。

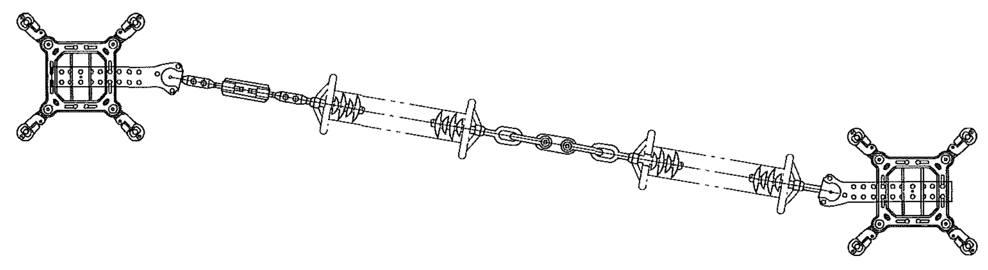


图 7-63　相间间隔棒

相间间隔棒的金具连接方式包括两点式连接和四点式连接，根据运行经验，四点式连接方式稳定性相对较好。

3. 双摆防舞器

双摆防舞器是基于稳定性机理研制开发的一种具有良好防舞性能的装置，旨在提高导线系统的动力稳定性，同时也兼具压重防舞的功能。目前双摆防舞器已经大量应用于我国多条分裂导线线路上，取得了较好的防舞效果，积累了丰富的经验，是我国架空输电线路应用最为广泛的防舞装置。双摆防舞器属于刚性防舞器，从应用经验来看，如果设计合理，则能有效防舞，如果设计不合理，则线路仍可能发生舞动，但从总体情况来看，双摆防舞器基本能防止或一定程度上抑制舞动。双摆防舞器还具有造价较低、安装方便等特点，如图 7-64 所示。

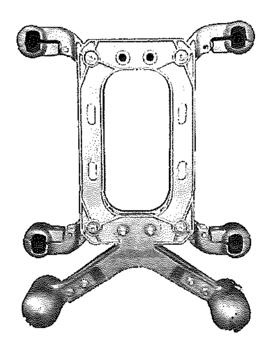


图 7-64　双摆防舞器

4. 失谐摆

失谐摆（适用于单导线）是在导线下方装一质量为 m、臂长为 r 的重锤的一种机械装置。失谐摆是基于扭振激发机理，运用失谐摆来调整扭振固有频率，使之与横向振动的高阶固有频率分离，从而防止其耦合而诱发舞动。国内有所应用，但应用范围较小。失谐摆如图 7-65 所示。

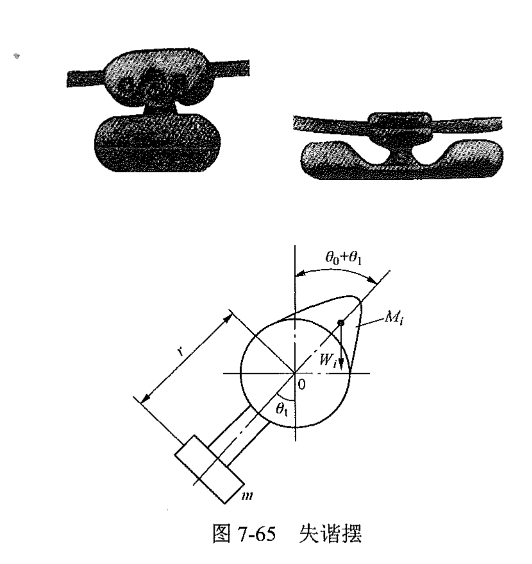


图 7-65　失谐摆

5. 偏心重锤

偏心重锤具有提高动力稳定性、提供扭转反馈控制、扰乱沿档气流分布等综合防舞功能，而造价比较低廉，是一种经济有效的防舞装置。整体式偏心重锤已经应用于我国输电线路的防舞实践中，防舞设计中应注意重锤质量的设计，避免质量过大，导致线路微风振动超标。偏心重锤如图 7-66 所示。

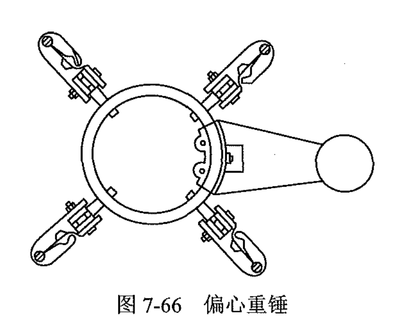


图 7-66 偏心重锤

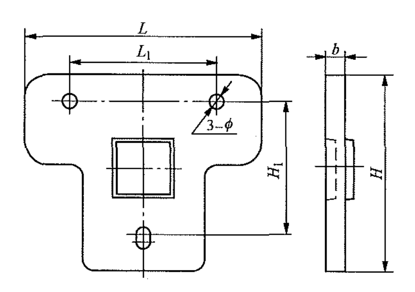


图 7-68 重锤外形及组装零件

五、其他保护金具

1. 悬重锤

悬重锤（也叫重锤）是当直线杆塔悬垂绝缘子串或非直线杆塔跳线绝缘子串风偏时对杆塔绝缘间隙不足所采用的保护金具。

双分裂及以下导线用的重锤由重锤片、重锤座和挂板组成。每个重锤座可以装 3 片重锤片，根据实际需要，重锤片超过三片可加挂三腿平行挂板，每加一个挂板可以增挂 3 片重锤。悬挂重锤用于一般悬垂线夹时，线夹应增加挂重锤用挂板，悬挂方法如图 7-67 所示。

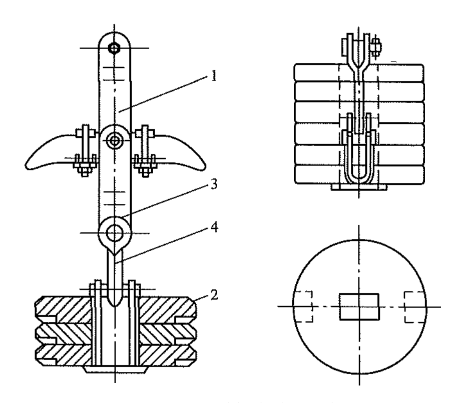


图 7-67 重锤悬挂方法

1—悬垂线夹；2—重锤；3—重锤挂板；4—U 型挂环

四分裂及以上导线用的重锤是将梯形重锤片串挂在联板的两侧，以三根螺杆固定，重锤轮廓尺寸在分裂导线线束间距内，因有导线屏蔽，在重锤上不会出现电晕。重锤外形及组装零件如图 7-68 所示。重锤片于联板上的安装方法如图 7-69 所示。

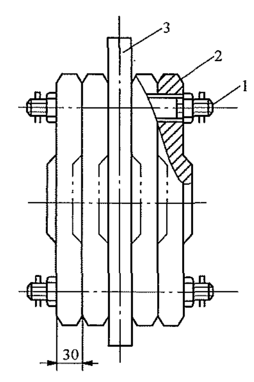


图 7-69 重锤片于联板上的安装方法

1—双头螺柱；2—重锤片；3—联板

2. 预绞丝护线条

预绞丝护线条的作用是加强导线抗振能力，用具有弹性的高强度铝合金丝按规定根数为一组制成螺旋状的预绞丝护线条，紧缠在导线的外层，装入悬挂点的线夹中，以增加导线刚度，减少导线在线夹出口处的附加弯曲应力。预绞丝护线条的形状如图 7-70 所示。

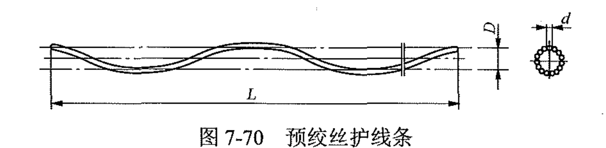


图 7-70 预绞丝护线条

3. 铝包带

铝包带是缠绕在外层铝线股的导线上，保护其表面的铝带，如图 7-71 所示。

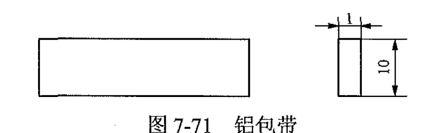


图 7-71 铝包带

铝包带的作用主要是避免导线直接接触线夹，保护导线不被线夹直接磨损。

第八章



杆　　塔

架空输电线路的杆塔是用来支撑电线的支撑结构。多由钢材或钢筋混凝土制成，也有木杆。杆塔是架空输电线路的重要设备之一。本章介绍架空输电线路常用杆塔的型式、分类及设计方法，并给出典型杆塔的设计案例。

第一节　杆塔型式选择

一、工程中杆塔型式分类

随着电网输电技术的发展，输电线路杆塔的类型不断增多，其分类如下：

（1）按照受力性质可分为悬垂型、耐张型杆塔。悬垂型杆塔可分为悬垂直线和悬垂转角杆塔；耐张型杆塔可分为耐张直线、耐张转角和终端杆塔。

（2）按照电气特性可分为交流、直流及交流紧凑型三类。交流属于三相供电；直流属于两极供电，塔头按正、负两极呈两极布置；交流紧凑型则将交流三相呈倒三角排列，缩小相间距离，以降低传输阻抗。

（3）按照回路数可分为单回路、双回路和多回路杆塔。单回路导线既可水平排列，也可三角排列或垂直排列；双回路和多回路杆塔导线可按垂直排列，必要时可考虑水平和垂直组合方式排列。

（4）按照使用材质主要可分为钢筋混凝土杆、钢管杆、自立式角钢塔和钢管塔、拉线塔、以及横担由钢索构成的悬索型拉线塔（简称悬索塔）。近年来，随着材料技术的不断发展，又陆续出现了复合材料杆塔和高强纤维混凝土杆，在我国也逐渐获得应用。

（5）按照地形情况可分为山地塔、平地塔及平丘塔。

二、工程中杆塔型式选择

在输电线路工程设计中，除导、地线选择外，应着重考虑杆塔型式的选用问题。杆塔型式的选择，一般应考虑以下几个方面。

（1）应进行单回路或同杆塔多回路塔型的选择。随着国民经济的不断发展，采用同杆塔双回（或多回）的输电线路日益增多，尤其是中低压线路则更为突出。输电线路是否采用同杆塔双回（或多回）并架，主要应考虑以下几点：

1）同一电源点至同一负荷点的双回（或多回）输电线路，除特殊或特别重要且供电网络比较薄弱外，一般应考虑同杆塔并架；

2）不同电源点或不同负荷点的线路位于同一走廊，且走廊受限制时，一般也应考虑双回（或多回）同杆塔并架；

3）城区线路，一般均与整个城市的电网规划相协调，为节约用地，一般宜采用双回（或多回）同杆塔并架。

（2）穿越采空区时，为防止不均匀沉降对杆塔的影响，可考虑采用单回路杆塔或单相（极）的分体杆塔。

（3）单回路穿越林区，若采用跨树方案，宜采用导线水平排列的杆塔（如酒杯塔）；若采用砍树方案，则宜采用线间距离较窄的三角排列（如猫头塔）或垂直排列杆塔（如 E 型塔）。

（4）重冰区线路宜采用导线水平对称排列的杆塔。

三、工程中常用杆塔型式

杆塔型式主要取决于电压等级、线路回数、地形及使用条件等。在满足上述要求下根据综合技术经济比较，择优选用。目前各级电压的输电线路常用的杆塔有以下种类（图中尺寸仅供参考）。

（一）钢筋混凝土电杆

1. 35～110kV 单回路直线杆

此类电杆通常可设计成单杆，导线呈三角形布置；主杆可用梢径ϕ150～ϕ190，全长 15～18m 的锥形杆。当承受的荷载较小时，一般使用无拉线单杆［见图 8-1（a）］；当承受的荷载较大（如导线截面大、档距大等）时，可使用带拉线的单杆［见图 8-1（b）］或不带拉线的双杆（见图 8-2）。

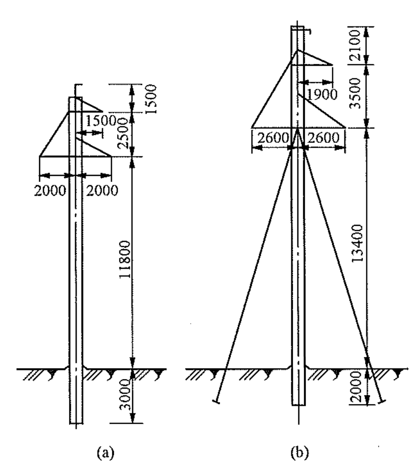


图 8-1　35～110kV 钢筋混凝土单杆

（a）无拉线单杆；（b）有拉线单杆

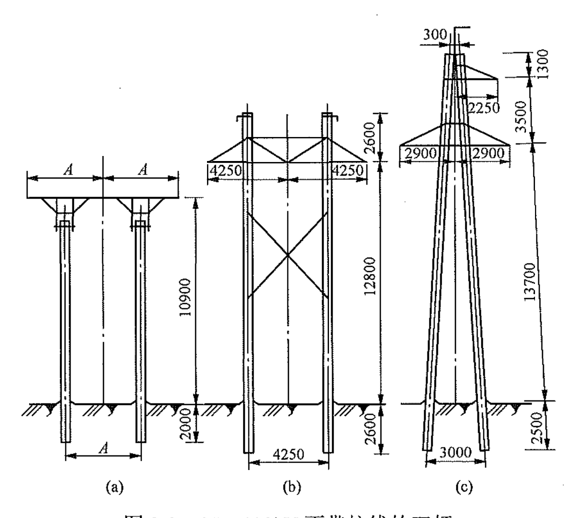


图 8-2　35～110kV 不带拉线的双杆

（a）不带避雷线的门型双杆；（b）带叉梁的门型双杆；

（c）A 字型双杆

2. 220～330kV 单回路直线杆

由于这一电压等级的杆塔荷载较大，大多采用带叉梁的双杆或带拉线的八字杆，少数荷载较小的线路也采用带拉线的单杆。

带叉梁的双杆［见图 8-3（a）］，一般可采用梢径 ϕ190～ϕ230，全长 27m 左右的锥形杆段或 ϕ400 等径杆段，在主杆平面内设置一层或两层叉梁，以减小主杆所受的弯矩，有时还可在电杆平面外设置 V 型外拉线，以增加电杆的纵向稳定和承受纵向荷载。带双层叉梁的直线双杆，由于根部弯矩较小，对软弱地基的基础设计较为有利。

在东北地区由于土壤冻结深度较大，土壤的冻胀作用会将卡盘及电杆抬起，一般不宜采用卡盘来平衡电杆根部的倾覆力矩，大多采用带 V 型或交叉外拉线的八字型杆［见图 8-3（b）］。这种电杆结构简单，耗用钢材少，在东北地区有成熟的运行经验。

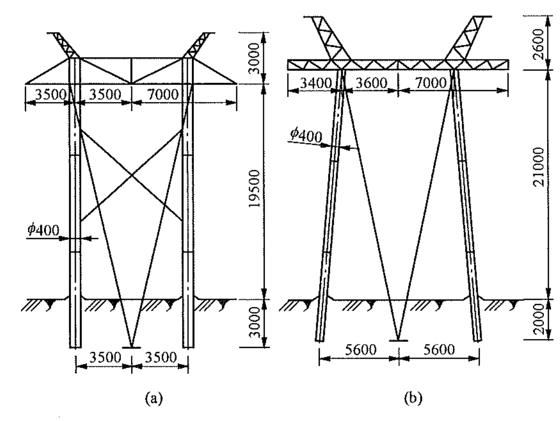


图 8-3　220～330kV 带拉线的双杆

（a）带拉线和叉梁的门型双杆；

（b）带拉线的八字型杆

3. 35～110kV 双回路直线杆

35～110kV 双回路直线杆大多采用 A 字型双杆（见图 8-4），主杆采用锥形杆段，荷载较大时还可设置外拉线。这种杆型结构简单，受力性能好，耗钢量也较少，是一种较好的双回路杆型。

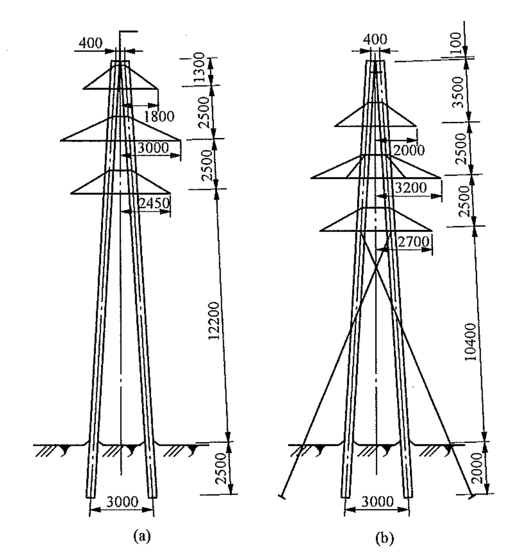


图 8-4　35～110kV 双回路直线杆

（a）不带拉线的 A 字型双杆；

（b）带拉线的 A 字型双杆

4. 耐张杆

耐张杆（指转角杆、终端杆）所承受的荷载较大，当采用钢筋混凝土杆时一般均需设置拉线。

35～110kV 单回路耐张杆的外形一般为 A 字型［见图 8-5（a）］或门型，拉线布置方式在小转角时可

用V型或交叉型；大转角时可用八字型，必要时还要设置反向拉线和分角拉线。

220kV 耐张杆一般采用带拉线的门型双杆［见图 8-5（b）］，主杆常用ϕ400 等径杆，横担用钢结构，拉线大多布置成交叉拉线或八字型拉线，必要时还需设置分角拉线和反向拉线。

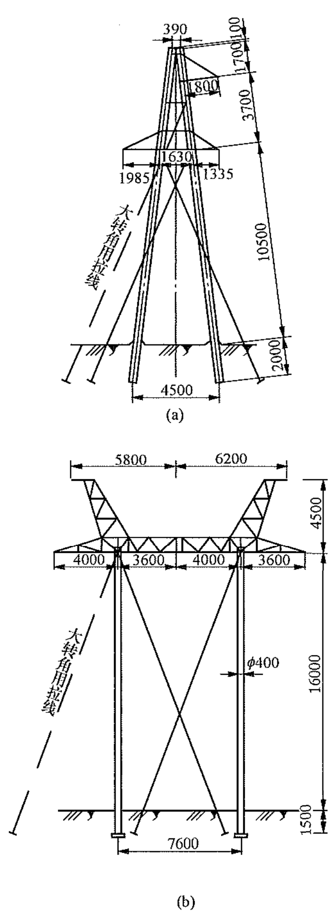


图 8-5　单回路耐张杆

（a）35～110kV A 字型耐张杆；

（b）220kV 门型耐张杆

（二）钢管杆

钢管杆具有占地面积小、外形美观及施工便捷等优点，因此在城区输电线路的建设中被广泛应用。66kV 单回路钢管杆如图 8-6 所示，110kV 悬垂杆如图 8-7 所示。

（三）铁塔

铁塔是高压输电线路上最常用的支持物，国内外大多采用热轧等肢角钢制造、螺栓组装的空间桁架结构，也有少数工程采用冷弯型钢、钢管或钢管混凝土结构。根据结构型式和受力特点，铁塔可分为拉线塔和自立式塔两大类。

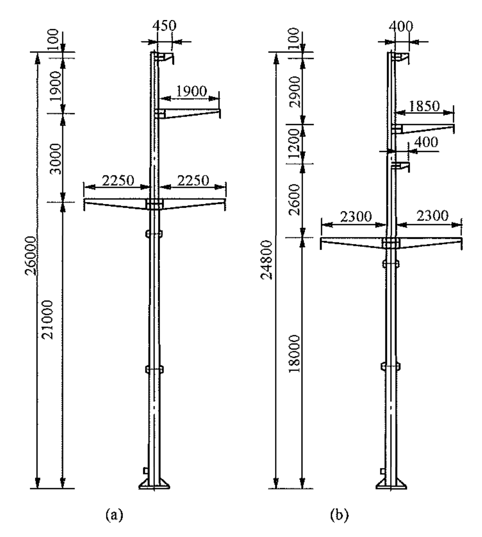


图 8-6　66kV 单回路钢管杆

（a）悬垂杆；（b）耐张杆

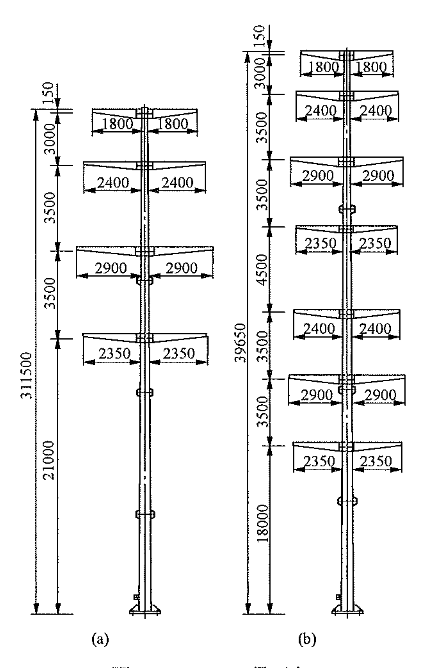


图 8-7　110kV 悬垂杆

（a）双回路杆；（b）四回路杆

1. 拉线塔

拉线塔由塔头、主柱和拉线组成。塔头和主柱一般由角钢组成的空间桁架构成，有较好的整体稳定性，能承受较大的轴向压力。拉线一般用高强度钢绞线做成，能承受很大的拉力，因而使拉线塔能充分利用材料的强度特性而减少材料耗用量。

就外形而言，拉线塔可设计成导线呈三角形排列的上字型、猫头型（见图 8-8）等，以及导线呈水平排列的门型、V 型（见图 8-9）等。

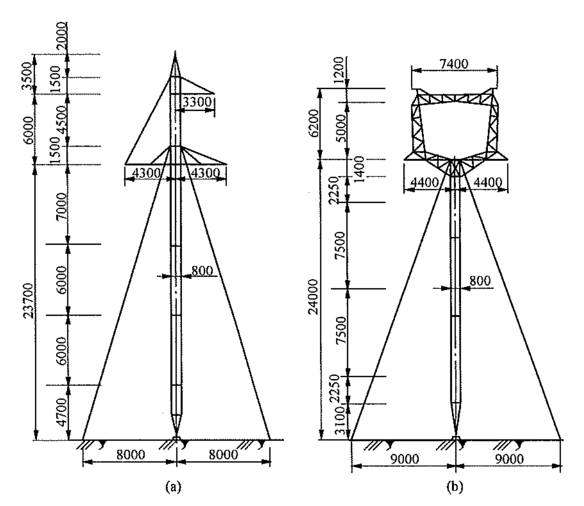


图 8-8　220kV 导线呈三角排列的拉线铁塔

（a）上字型拉线塔；（b）猫头型拉线塔

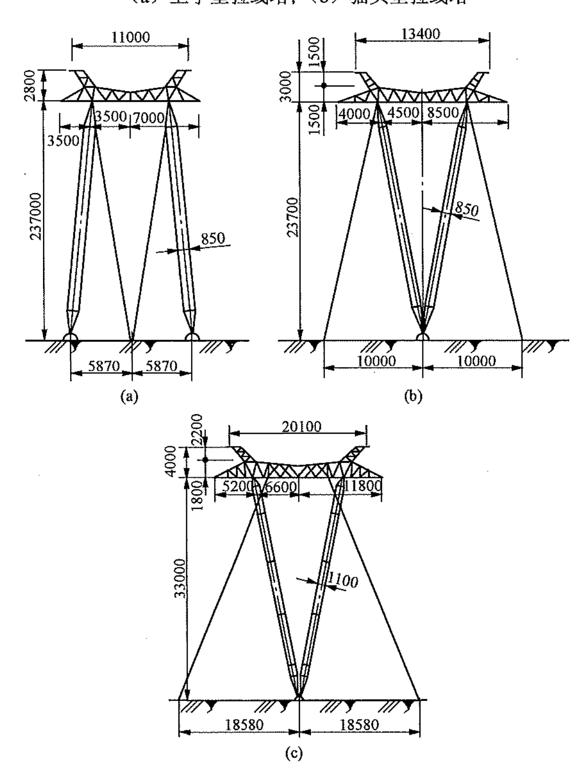


图 8-9　导线呈水平排列的拉线铁塔

（a）220kV 门型拉线塔；（b）220kV V 型拉线塔；

（c）500kV V 型拉线塔

悬索塔属于非线性大位移软横担结构，加拿大及南非等国使用较多，我国也曾在 500kV 伊敏—冯屯—大庆工程中进行过设计、试验及试点使用，效果良好，但由于其拉线占地面积大，维护工作繁复，所以未予推广（见图 8-10）。

2. 自立塔

交流单回路悬垂塔常用的有导线呈三角形排列的上字型、鸟骨型、猫头型和导线呈水平排列的酒杯型、门型两大类（见图 8-11 和图 8-12）。

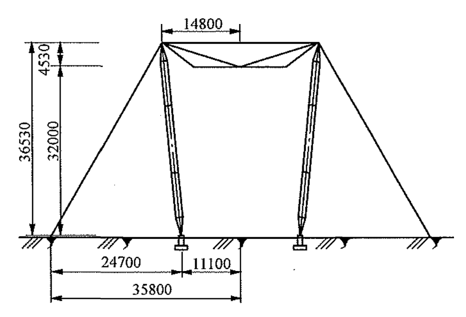


图 8-10　500kV 悬索塔

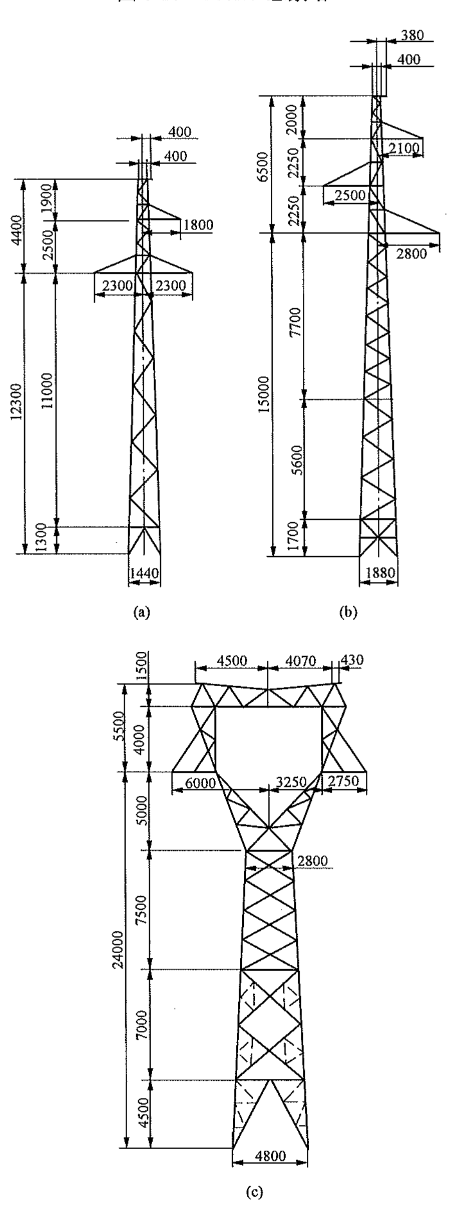
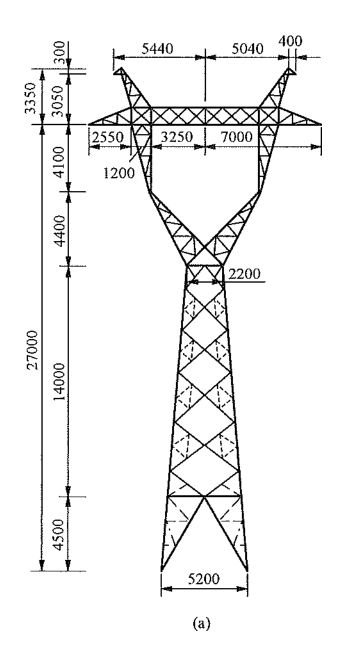


图 8-11　导线呈三角形排列的交流单回路悬垂塔

（a）66kV 上字型；（b）66kV 鸟骨型；（c）220kV 猫头型



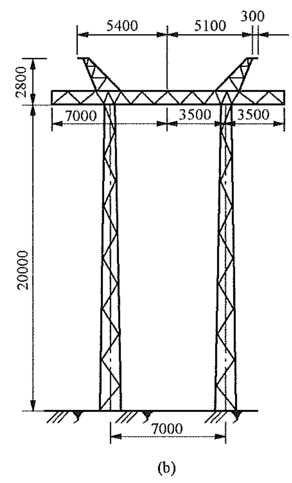


图 8-12　220kV 导线呈水平排列的交流单回路悬垂塔

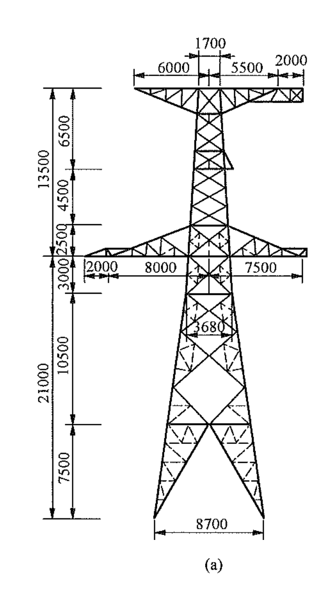
（a）酒杯型；（b）门型

交流单回路耐张塔主要采用干字型和酒杯型。干字型塔结构简单，传力清晰，且比较经济，是最常用的耐张塔型；酒杯型耐张塔，由于导线呈水平排列，可有效减小导线高度和铁塔全高，目前常用于下穿其他线路（见图 8-13）。

交流双回路铁塔有鼓型（或称六角型）、倒伞型、正伞型和蝴蝶型等。目前国内大多采用鼓型。蝴蝶型一般多用于大跨越塔（见图 8-14）。

直流单回路悬垂塔导线通常呈水平排列，常用的塔型有羊角型塔、干字型；局部走廊拥挤地段亦可采用导线呈垂直排列的 F 型塔。直流单回路耐张塔主要采用干字型。亦可将导线和回流线同塔架设如图 8-15 所示。

我国特高压输电领域经过十余年的不断创新发展，并经多个工程的实践应用，逐步积累和完善了特高压交、直流输电铁塔的设计、制造和施工技术。常用的特高压直流极导线通常采用水平排列见图 8-16，接地极线路一般采用单地线见图 8-17。特高压交流单回路悬垂塔通常采用酒杯型，耐张塔采用干字型见图 8-18。特高压交流双回路塔通常采用钢管构件，铁塔结构型式简洁，传力清晰，见图 8-19。



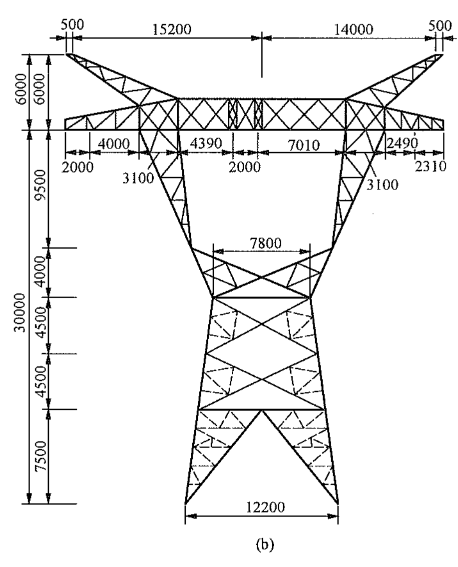


图 8-13　500kV 交流单回路耐张塔

（a）干字型；（b）酒杯型

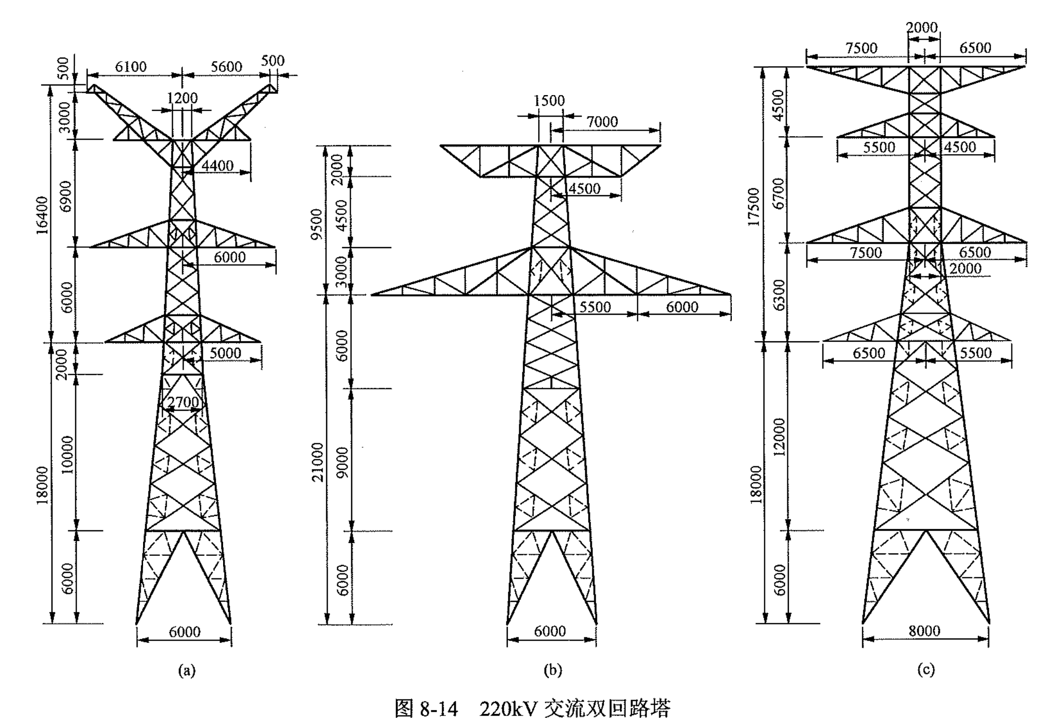


图 8-14 220kV 交流双回路塔

（a）鼓型悬垂塔；（b）蝴蝶型悬垂塔；（c）耐张塔

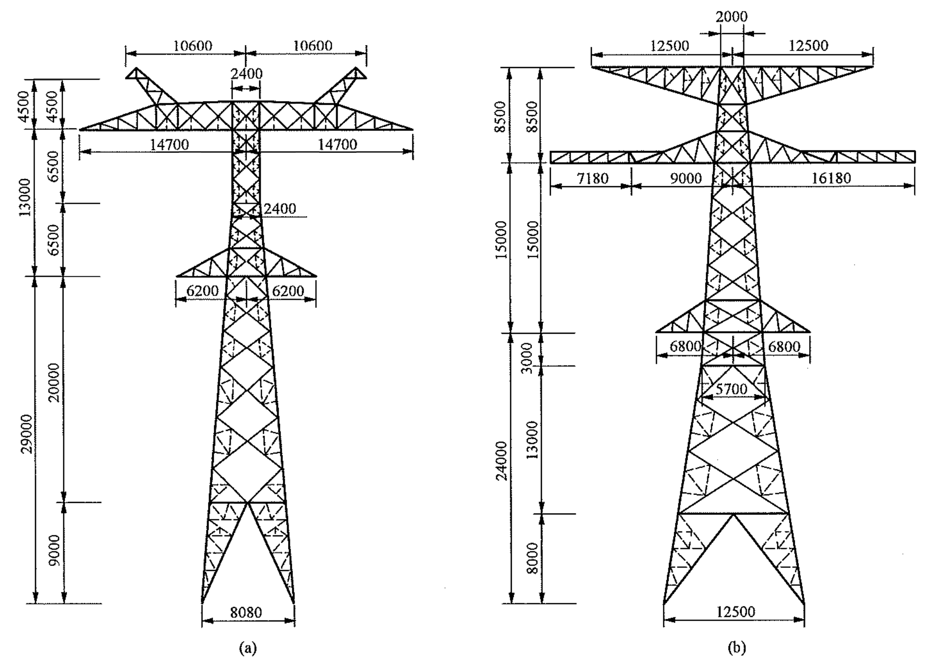


图 8-15 500kV 柔性直流极导线及回流线同塔

（a）悬垂塔；（b）耐张塔

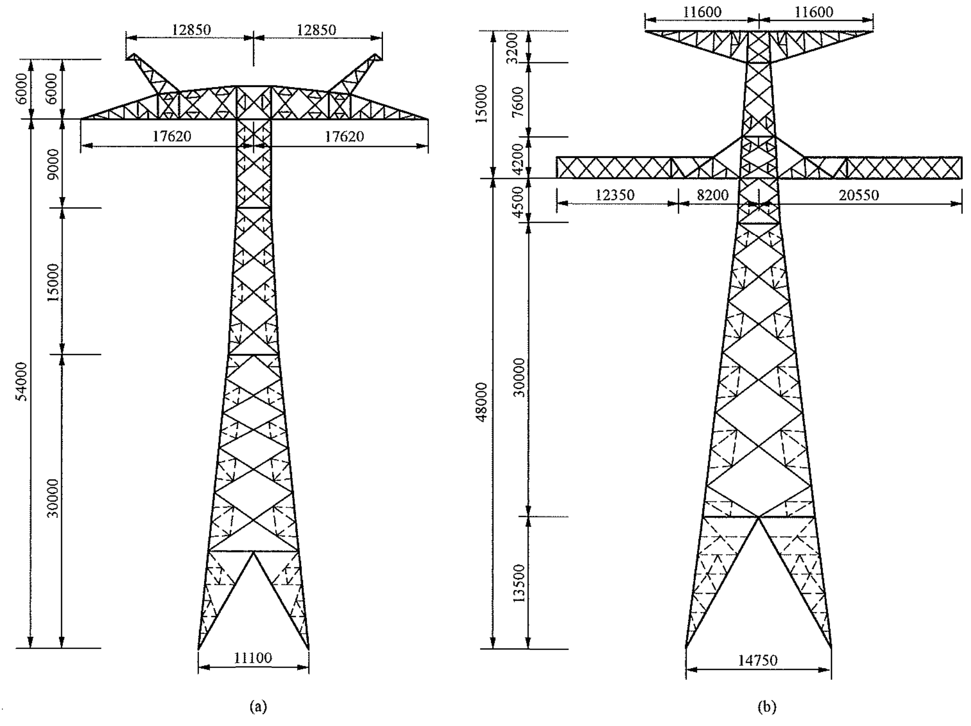


图 8-16 ±800kV 特高压直流塔

（a）悬垂塔；（b）耐张塔

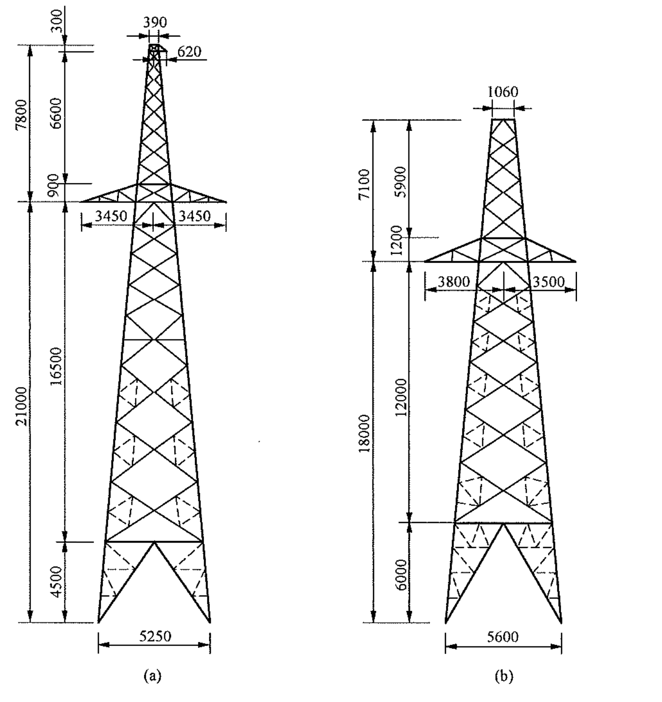


图 8-17 接地极塔

（a）悬垂塔；（b）耐张塔

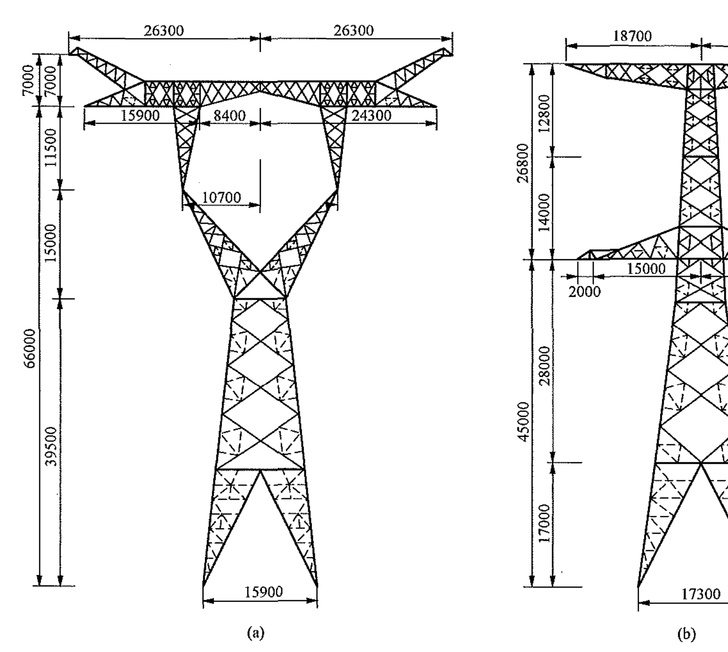


图 8-18　1000kV 特高压交流单回路塔

（a）悬垂塔；（b）耐张塔

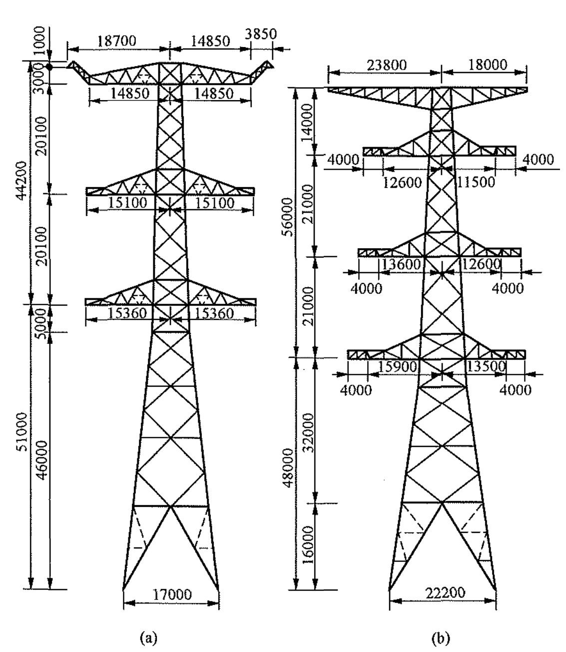


图 8-19　1000kV 特高压交流双回路钢管塔

（a）悬垂塔；（b）耐张塔

第二节　杆　塔　规　划

一、杆塔规划的内容

输电线路工程中的杆塔规划主要包括：杆塔塔型选择；杆塔使用条件系列规划；直线塔塔头间隙规划；耐张塔塔头间隙规划；杆塔塔高系列规划等。

1. 杆塔塔型选择

本章第一节杆塔型式选择中，就杆塔类型，杆塔选用的注意事项及常用的杆塔型式进行了介绍。本节则说明在工程设计中如何根据实际情况选择需要的杆塔型式。

在进行杆塔塔型选择前，首先应了解线路工程的电压类别（交、直流），电压等级，气象条件，回路数，海拔，地形、地貌，交叉跨越等实际情况，并收集以下资料。

（1）调查线路沿线地质、水文，树木等植被分布，矿区分布，变电站进出线，相序等情况；

（2）调查是否存在人口密集区、各类规划区及自然保护区等线路走廊受限制地区；

（3）调查是否存在微地形、微气象地段，以及是否存在重冰区及舞动地区。

根据上述线路所经地区的特征，确定杆塔按同塔（杆）几回路设计，是用杆还是用塔，是否需要采用全方位高低腿。确定是否需要规划用于重要交叉跨越或跨越成片林的杆塔。确定是否需要规划拥挤地段走廊用的特殊杆塔。确定是否需要换位或换相塔等。

2. 杆塔使用条件系列规划

杆塔使用条件系列规划是指杆塔的水平档距系列规划、垂直档距系列规划、耐张塔转角度数规划、直线转角塔转角度数规划。

众所周知，输电线路的杆塔系按路径走向沿线配置。随着地形的起伏波动，沿线各杆塔的档距大小不

等，几乎每塔一个档距（包括水平档距及垂直档距）。据此情况，若按耗钢量最少的原则来考虑，沿线配置的每个杆塔，都应按其自身的档距（即水平档距和垂直档距）来进行设计。这样，势必造成几乎每基塔位的杆塔都要提交一份杆塔施工加工图，并进行制造、放样及加工。200个塔位就需要设计、加工及制造200基不同质量（即使相差很小）的杆塔，这在实际上是不可能的，也是不经济的。因此，设计时必须对沿线配置的杆塔使用条件（水平档距及垂直档距）进行归纳、整理，研究根据工程情况，选用哪几种使用条件的杆塔用于工程中比较经济、合理。这样，既不需要按所排塔位逐塔（杆）进行设计，也能保证工程的耗钢量及其投资比较经济合理，这就需要进行杆塔用水平档距及垂直档距的系列规划，以确定各个工程需要的直线型杆塔的类型数量及其相应的使用条件（杆塔水平档距及垂直档距）。耐张塔转角度数规划和直线转角塔转角度数规划同步进行。

图8-21示出了国内某特高压工程中直线型杆塔使用系列（如三塔系列表示工程中使用三种不同水平档距和垂直档距的杆塔）与杆塔质量及综合利用系数的关系曲线。此曲线是使用动态规划原理进行无约束条件的优化排位，并利用优选法进行归纳得出的。在实际工程中即以此曲线并结合工程情况进行权衡，以最终确定直线型杆塔的使用系列。

当然，耐张塔亦可按此进行规划，但考虑到耐张塔数量较少，且耐张塔多数系角度荷载起控制作用，少量的水平档距及垂直档距的变化量对塔重影响较小，因此，耐张塔一般均以转角度数的规划来分类。在此基础上可参照优化定位所获得的各型转角塔的水平档距及垂直档距，合理确定其使用条件系列。

3. 直线塔塔头间隙规划

在杆塔规划阶段，直线塔塔头间隙规划的主要工作之一是直线塔摇摆角系数（杆塔垂直档距/杆塔水平档距，称K_v值）的规划，在工程中应与杆塔荷载系列规划同步进行，要依据无约束条件的优化定位成果，进行归纳整理得出，一般情况下，随着杆塔使用条件的增大，其K_v值亦应有所减小，塔头间隙也应有所增加，以适应杆塔使用范围扩大后的需要。

4. 耐张塔塔头间隙规划

耐张塔塔头间隙规划主要与转角度数的大小有关，也涉及跳线类别（如刚性、柔性）的选取及跳线绝缘子串的应用。一般来讲，随着转角度数的增大，杆塔上两侧（转角内侧及外侧）横担的长度会有所不同，而且随着跳线绝缘子串的应用，也会影响到横担尺寸的长短，所有这些均会对塔头布置及塔头尺寸的变化带来影响。

5. 杆塔塔高系列规划

杆塔的塔高系列规划即与杆塔的使用条件系列规划有关，也与工程中的地形及交叉跨越情况有关。

杆塔塔高规划与使用条件系列规划有关之点主要体现在杆塔的基准设计塔高（基准设计塔高是指杆塔计算时采用的计算呼高，在实际应用中，当塔高超过基准高度时，应缩小档距使用，当塔高小于基准塔高时，可放大档距使用）的确定上。随着各杆塔使用条件的增加，其基准塔高理应随之增加，以适应杆塔使用范围扩大后的需要。

杆塔塔高规划与交叉跨越的关系主要体现在杆塔的最大使用高度上。在工程设计中，任何型式的杆塔，其最大允许使用高度往往比杆塔的基准塔高要高，以适应跨越的需要。由此导致的杆塔外荷载及杆件受力的增加可用缩小杆塔使用档距予以补偿。

有些情况下，根据交叉跨越及地形情况（如跨越多层被跨越物或跨越自然生长高度较高的林木），可专门设计出使用档距较小而塔高较高的专用跨越塔。

各型杆塔的基准塔高，最大允许设计塔高，以及是否需要设计专门的跨越塔等，均应根据无约束条件的优化定位所显示的数据经综合归纳后确定。

上述各型塔的基准塔高及各塔高所允许的使用档距（包括缩档后的水平档距及垂直档距）均应在设计图纸上予以表明。

二、杆塔规划方法

在进行杆塔使用条件规划时首先需要对输电线路沿线的条件进行调查，确定满足工程需要的杆塔型式及杆塔规划需要遵循的设计原则，然后在线路工程的横断面上采用动态规划的数学方法进行杆塔无约束条件优化排位。优化排位的目标是在满足技术要求的条件下使工程造价最低。最后在同样的目标条件下对优化排位结果利用黄金分割的数学方法进行杆塔的水平档距、垂直档距、塔高、线路转角及塔头间隙等的规划。

杆塔规划的过程中可进行一塔、两塔、三塔、四塔、五塔、六塔等多个系列方案的规划（见图8-21），并对各个方案的塔重及综合造价进行比较分析，合理确定出规划的杆塔使用条件系列。

1. 杆塔塔重指标评价

在杆塔无约束条件的优化排位过程中，随时需要调用杆塔费用指标（或杆塔塔重指标）及基础施工费用等。通常杆塔的塔重与其水平荷载、垂直荷载、纵向荷载和杆塔高度有关，可表示为

$$F_G = f(F_h, F_v, F_t, h) \qquad (8\text{-}1)$$

式中　F_G——塔重；

F_h ——水平荷载；
F_v ——垂直荷载；
F_t ——纵向荷载；
h ——杆塔高度。

从式（8-1）的函数可确定任何一个参数变化对塔重的影响。

计算杆塔塔重有多种方法，比如塔重数据库法、统计分析法等，目前国内多采用塔重数据库法。杆塔塔重数据库法是将不同外荷载的塔重分别计算出来，建立相应的杆塔塔重数据库。利用该方法计算出的杆塔塔重比较准确。建立塔重数据库有两种方法，一种是采用内力分析软件计算，另一种采用公式计算，采用内力分析软件计算比较准确。采用公式计算输入数据量少，计算速度快，国内开展 1000kV 特高压输电线路设计初期给出了设计荷载与塔重的关系式，见式（8-2），供设计人员参考使用。

$$F_G = K_0K_1K_2K_3K_4K_5K_6K_7K_8\left(1.44+\frac{L_a}{125}\right)\times H\times\left(T^{\frac{2}{3}}+F_V^{\frac{1}{2}}+L^{\frac{2}{3}}\right) \tag{8-2}$$

式中 K_0——比例系数， $K_0 = e^{-0.8675}$ 。

K_1——长短腿设计影响系数，当长短腿级差不大于 2m 时，K_1 取值 1.0；当 2m＜长短腿级差≤6m 时，K_1 取值 1.05；当 6m＜长短腿级差≤9m 时，K_1 取值 1.07。

K_2——OPGW 开断影响系数，当在二型直线塔上进行 OPGW 开断时，可取 1.02～1.03；当在三型直线塔上进行 OPGW 开断时，可取 1.01～1.02。

K_3——起算高度影响系数， $K_3=\left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{0.1}$ ，h_1 为起算呼高，h_2 为呼称高。

K_4——塔身风荷载影响系数，当设计风速 27＜V≤29m/s， $K_4=\left(\frac{27}{V}\right)^{0.8}$ ；当设计风速 V≤27m/s 或 V＞29m/s， $K_4=\left(\frac{V}{27}\right)^{0.8}$ 。

K_5——覆冰厚度影响系数，对于重冰区铁塔塔重通过计算分析和适配，K_5 可取 1.65。

K_6——转角度数影响系数，以 20° 为基础转角度数影响系数 $K_6=\left(\frac{\theta}{20}\right)^{0.2}$ 。

K_7——主材角钢断面型式影响系数，主材角钢断面型式为双角钢时 K_7=1.1。

K_8 ——导线分裂数影响系数，对单回路杆塔导线分裂数影响系数 K_8 可以 4 分裂为基准取 $\left(\frac{n}{4}\right)^{0.285}$ ，对双回路杆塔 K_8=1.0。

L_a ——横担最大长度（以杆塔中心起算）。

H——水平荷载影响高度， $H=\frac{\sum ht}{\sum t}$ 。

F_{TH} ——导、地线水平风荷载总和，$F_{TH}=\sum F_H$ ，轻冰区取大风工况，中、重冰区取覆冰工况。

F_V ——导、地线垂直荷载总和。

L ——导、地线不平衡张力总和，直线塔取 0，耐张塔取大风工况。

T ——导线、地线水平荷载总和，轻冰区取大风工况，中、重冰区取覆冰工况。

h ——导、地线水平荷载作用点高度（以地面起算）。

t——导、地线水平荷载，轻冰区取大风工况，中重冰区取覆冰工况。

2. 沿线综合指标评价

为能准确地分析、评价线路的综合费用对杆塔规划的影响，应根据不同的地形、地质条件、塔位占地、土石方量、基础工程量等进行综合分析，按照不同的地形、地质及交通条件给出沿线每基塔的基础施工的综合费用。

3. 杆塔的排位优化

杆塔排位优化采用动态规划的方法，确定出给定线路路径的最优杆塔排位方案。动态规划的基本数学公式见式（8-3）～式（8-5）。

$$C_{\min,i-1}(N_{i-1}, H_{i-1}) = \min\left[C_{\min}(N_{a-1},H_{a-1})+C(H_{i-1})+D(N_{i-1},H_{i-1})\right] \tag{8-3}$$

$$C_{\min}=C_{\min,i-1}(N_{n-1}, H_{n-1})+D(N_n,H_n) \tag{8-4}$$

式中 $C_{\min,i-1}(N_{i-1}, H_{i-1})$ ——线路起点至 N_i 定位点，并在该点采用杆塔 H_i 时，累计到第 N_{i-1} 定位点并在该点采用杆塔 H_{i-1} 的最小费用；

$C_{\min}(N_{a-1},H_{a-1})$ ——线路起点至 N_a 定位点，并在该点采用杆塔 H_a 时，累计到第 N_{a-1} 定位点并在该点采用杆塔 H_{a-1} 的最小费用，且从 N_a 可一档跨到 N_i；

$C(H_{i-1})$ ——杆塔 H_{i-1} 的费用；

$D(N_{i-1},H_{i-1})$ ——在 N_{i-1} 定位点，采用杆塔 H_{i-1} 时的绝缘子串、

基础及其他费用；

C_{min} ——线路起点至最后一定位点并在该点采用杆塔 H_n 的最小费用；

$C(H_n)$ ——杆塔 H_n 的费用；

$D(N_n,H_n)$ ——最后一定位点的绝缘子串、基础及其他费用。

$$C_{min,i-1}(N_b,H_{b1}/N_i,H_{i1})$$
$$=\min\left[C_{min}(N_i,H_{i1}/N_a,H_{a1})+C(H_{b1})+D(N_b,H_{b1})\right] \quad (8\text{-}5)$$

式中 $C_{min\,i-1}(N_b,H_{b1}/N_i,H_{i1})$ ——从起点通过 (N_i,H_{i1}) 到达 N_b 点并在 N_b 点设立塔高为 H_{b1} 塔的最小费用；

$C_{min}(N_i,H_{i1}/N_a,H_{a1})$ ——从起点通过 (N_a,H_{a1}) 到达 N_i 点并在 N_i 点设立塔高为 H_{i1} 的最小费用；

$1\leqslant\cdots<a<i<b<\cdots\leqslant n$

$C(H_{b1})$ ——杆塔 H_{b1} 的费用，按式（8-6）计算。

$$C(H_b)=m_c\cdot CCOSTt \quad (8\text{-}6)$$

式中 m_c——杆塔质量；

$CCOSTt$ ——杆塔每吨价格；

$D(N_b,H_{b1})$ ——在 N_b 点采用塔高为 H_{b1} 的杆塔时的绝缘子串及基础等的费用。

在计算时：

a=1，2，3，…，n–1，a_1=1，2，3，…，q

b=1，2，3，…，n，b_1=1，2，3，…，q

i=1，2，3，…，p，i_1=1，2，3，…，q

N——断面上可立塔点总数；

Q——每个定位点可供选用的杆塔的数量（不同塔高视不同塔）；

p ——N_b 点所用的塔从其最小允许档距到最大允许档距间的立塔点的数量。

4. 杆塔使用条件系列规划

杆塔系列规划包括直线杆塔（包括直线转角塔）系列规划及耐张转角塔系列规划。

如前所述，在无约束条件下排位优化后可得到该路径上的最佳排位方案，但这些塔是在无约束条件下得出的，各塔的水平档距、垂直档距、纵向张力是按各自塔的使用情况得出的（相当于逐塔设计），若按此进行设计，则杆塔的设计、加工将极为复杂，也无太大意义，因此，在工程中需对按无约束条件排出的杆塔使用条件进行综合归纳，进行杆塔使用条件的系列规划。

直线塔杆塔使用条件的规划包括杆塔的水平荷载、垂直荷载和塔高等规划。外负荷对塔重的影响中，水平荷载起主要作用。因此，对荷载的规划以水平荷载为主进行。

假设优化排位的结果中直线塔最小水平档距为 L_{Ha}，最大水平档距为 L_{Hb}，则 $L_{Ha}<L_{H1}<L_{H2}<\cdots<L_{Hb}$。假设直线塔规划为 m 塔系列，即 m 种直线塔，则工程最小综合造价可按式（8-7）进行计算。

$$PC_{min}=\min[(N_m-N_{m-1})C_m+(N_{m-1}-N_{m-2})C_{m-1}+\cdots+(N_1-N_0)C_1] \quad (8\text{-}7)$$

即

$$PC_{min}=\min\left[\sum_{k=1}^{m}(N_k-N_{k-1})C_k\right] \quad (8\text{-}8)$$

式中 PC_{min} ——最小综合造价；

N_k ——水平档距小于 L_{Hk} 的杆塔的总基数，k=1，2，3，…，m；

C_k ——水平档距为 L_{Hk} 的一基杆塔造价，可由公式计算得出，或由杆塔造价数据库中查出；

m ——规划系列塔的塔型数；

$L_{Hm}=L_{Hb}$。

L_{H1}，…，L_{Hm} 即为所规划的 m 种直线塔最优水平档距系列，再对相应分组的垂直档距较大或较小的部分杆塔进行调整，即得到最优直线塔的系列规划。所规划出的水平档距、垂直档距即为在该地形情况下，采用 m 塔系列时，最为经济的杆塔使用条件（水平档距、垂直档距），亦称经济档距。

如前所述，耐张转角塔塔重主要取决于角度荷载，耐张转角塔系列应根据工程的具体转角情况结合水平档距、垂直档距及塔高等进行规划，从而得到最佳杆塔系列规划。

为提高杆塔规划计算速度，采取黄金分割的数学方法，计算过程如下：

（1）取 t=0.618，第一次在荷载区间［a_1，a_2］上取两个荷载试点 a_3 和 a_4，令

$$a_3=a_2-t(a_2-a_1)$$
$$a_4=a_1+t(a_2-a_1)$$

（2）计算 a_3，a_4 两个荷载试点杆塔总费用 $f(a_3)$，$f(a_4)$，并令

$$f_3=f(a_3);\ f_4=f(a_4)$$

如果 $f_3\leqslant f_4$，令

$$a_2=a_4;\ a_4=a_3;\ f_4=f_3;$$
$$a_3=a_2-t(a_2-a_1);\ f_3=f(a_3)$$

否则令

$$a_1=a_3;\ a_3=a_4;\ f_3=f_4;$$
$$a_4=a_1+t(a_2-a_1);\ f_4=f(a_4)$$

（3）重复第二步骤，直到$|f_3-f_4|$与$|a_3-a_4|$满足精度要求。此时的f_3（或f_4）为最低的杆塔总费用，a_3（或a_4）为最优荷载点。

三、示例

国内某特高压工程杆塔规划的过程及结果示例如下，供设计人员参考。

1. 杆塔水平档距系列规划

（1）直线塔水平档距系列规划。直线塔杆塔数量与水平档距的关系曲线以及直线塔水平档距的分布概率及累积概率图如图 8-20 所示。

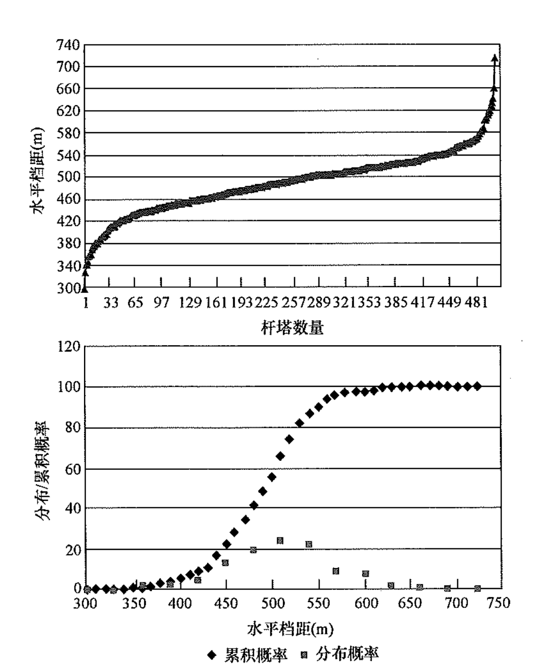


图 8-20 直线塔杆塔数量与水平档距的关系曲线及水平档距的分布概率及累积概率图

直线塔一塔、两塔、三塔、四塔、五塔、六塔系列方案水平档距规划的结果见表 8-1。直线塔杆塔质量及综合利用系数与杆塔方案数的关系曲线如图8-21 所示。

表 8-1 各系列方案的水平档距值、杆塔使用数量、水平档距利用系数、杆塔质量及综合费用比例

塔型	水平档距（m）	杆塔使用数量比例（%）	水平档距利用系数（%）	水平档距综合利用系数（%）	杆塔质量比例（%）	综合费用比例（%）
一塔方案	715	100.00	68.54	68.54	100.00	100.00
两塔方案	570	95.60	85.39	85.13	84.31	93.87
	715	4.40	85.12			
三塔方案	465	32.20	93.36	91.05	82.44	92.88
	568	63.00	90.34			
	715	4.80	84.92			
四塔方案	465	32.00	92.77	93.43	81.19	92.27
	520	39.50	95.47			
	582	24.50	92.38			
	715	4.00	84.89			
五塔方案	465	32.00	92.77	94.26	80.73	92.10
	520	39.50	95.47			
	568	23.50	94.37			
	624	4.00	94.07			
	715	1.00	91.69			
六塔方案	440	16.40	93.99	95.30	80.45	92.00
	475	20.40	93.23			
	520	35.20	94.20			
	570	23.30	96.08			
	635	4.10	97.53			
	715	0.60	93.00			

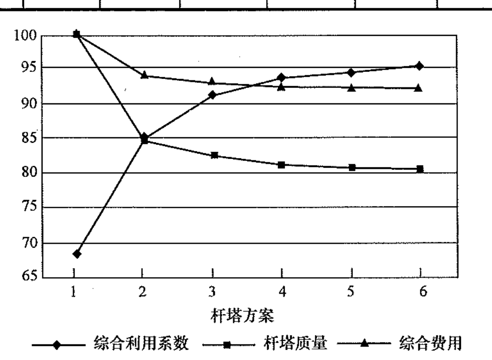


图 8-21 直线塔杆塔质量及综合利用系数与杆塔方案数的关系曲线

根据上述统计分析结果，直线塔规划出的水平档距系列见表 8-2。

表 8-2 直线塔规划的水平档距使用范围

塔型	水平档距（m）
Ⅰ	460
Ⅱ	520
Ⅲ	580
Ⅳ	750

（2）耐张塔水平档距系列规划。耐张塔杆塔数量与水平档距关系曲线以及耐张塔水平档距的分布概率及累积概率图如图 8-22 所示。

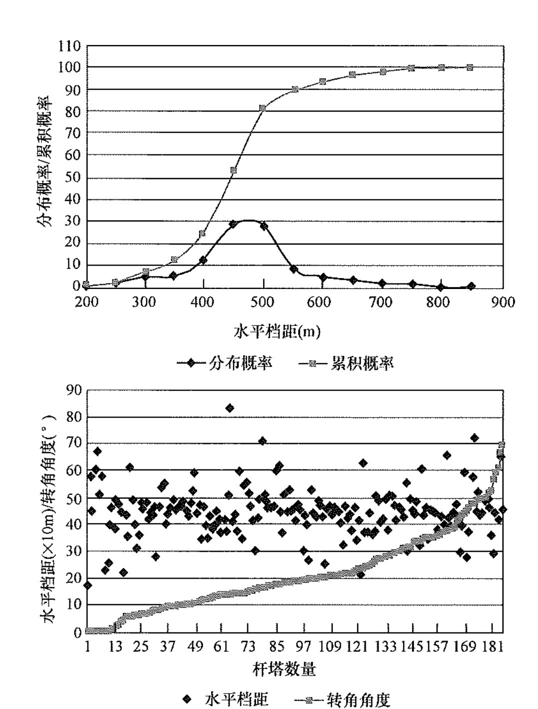


图 8-22　耐张塔杆塔数量与水平档距关系曲线及耐张塔水平档距的分布概率及累积概率图

耐张塔规划出的水平档距系列见表 8-3。

表 8-3　规划的耐张塔水平档距使用范围

塔型	转角度数	水平档距（m）
JT1	0～20°	550
JT2	20°～40°	550
JT3	40°～70°	550
JT4	0～70°	550
JD	0～60°终端	400

2. 杆塔垂直档距系列规划

（1）直线塔垂直档距系列规划。直线塔杆塔数量与垂直档距的关系曲线以及直线塔水平档距的分布概率及累积概率图如图 8-23 所示。

直线塔规划出的垂直档距系列见表 8-4。

（2）耐张塔垂直档距系列规划。耐张塔杆塔数量与垂直档距的关系曲线以及耐张塔水平档距的分布概率及累积概率图如图 8-24 所示。

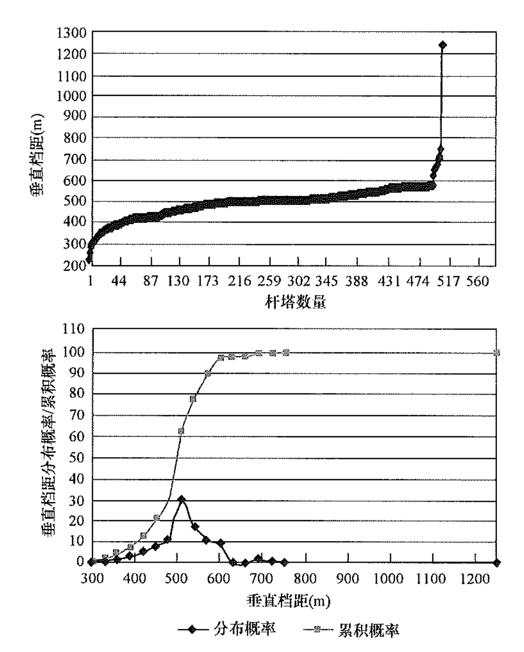


图 8-23　直线塔杆塔数量与垂直档距的关系曲线及直线塔垂直档距的分布概率及累积概率图

表 8-4　直线塔规划的垂直档距使用范围

塔型	垂直档距（m）
Ⅰ	600
Ⅱ	650
Ⅲ	700
Ⅳ	850

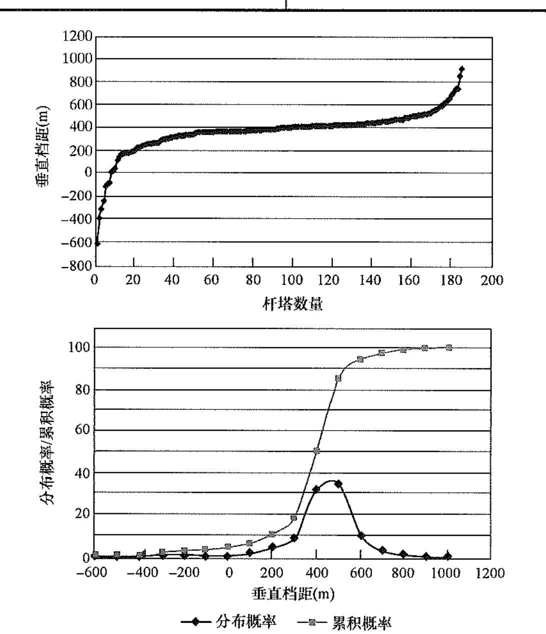


图 8-24　耐张塔杆塔数量与垂直档距的关系曲线及耐张塔垂直档距的分布概率及累积概率图

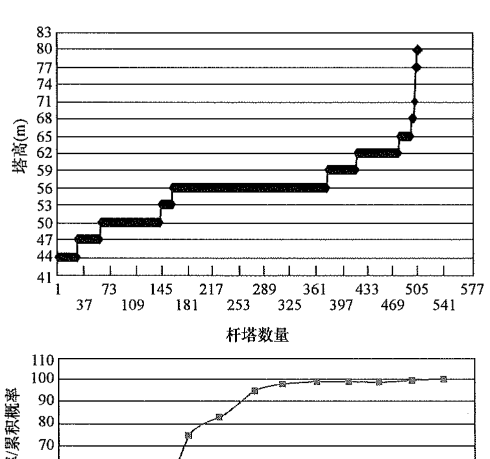
耐张塔规划出的垂直档距系列见表 8-5。

表 8-5 耐张塔规划的垂直档距使用范围

塔型	转角度数	垂直档距（m）
JT1	0～20°	−400～800
JT2	20°～40°	−400～800
JT3	40°～70°	−400～800
JT4	0～70°	−400～1000
JD	0～60°终端	500

3. 杆塔塔高系列规划

（1）直线塔塔高系列规划。直线塔杆塔数量与塔高的关系曲线以及直线塔塔高的分布概率及累积概率图如图 8-25 所示。



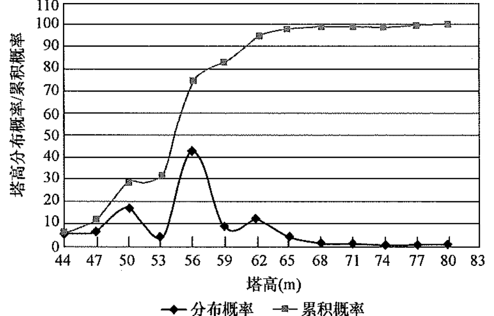


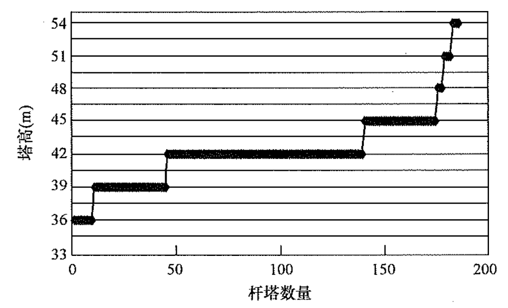
图 8-25 直线塔杆塔数量与塔高的关系曲线及塔高的分布概率及累积概率图

直线塔规划出的塔高系列见表 8-6。

表 8-6 直线塔规划的塔高范围

塔型	塔高（m）	使用范围
Ⅰ	44～56	一般地区
Ⅱ	50～59（62～65）	一般地区
Ⅲ	50～65（68～77）	负荷稍大地区、跨越林区（跨越 220kV、500kV 线路等重要设施和负荷较大地区）
Ⅳ	56～86	跨越河流、水库、山区等负荷较大地区

（2）耐张塔塔高系列规划。耐张塔杆塔数量与塔高的关系曲线以及耐张塔塔高的分布概率及累积概率图如图 8-26 所示。



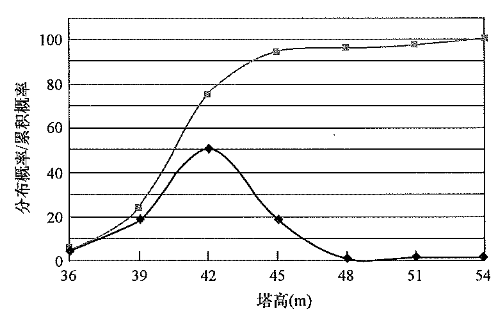


图 8-26 耐张塔杆塔数量与塔高的关系曲线及塔高的分布概率及累积概率图

耐张塔规划出的塔高系列见表 8-7。

表 8-7 耐张塔规划的塔高使用范围

塔型	转角度数	塔高（m）
JT1	0～20°	36～45
JT2	20°～40°	36～45
JT3	40°～70°	36～45
JT4	0～70°	48～54
JD	0～60°终端	45～57

4. 直线塔摇摆角系数（K_v）系列规划

直线塔杆塔数量与摇摆角系数 K_v 关系曲线及摇摆角系数 K_v 的分布概率及累积概率曲线如图 8-27 所示。

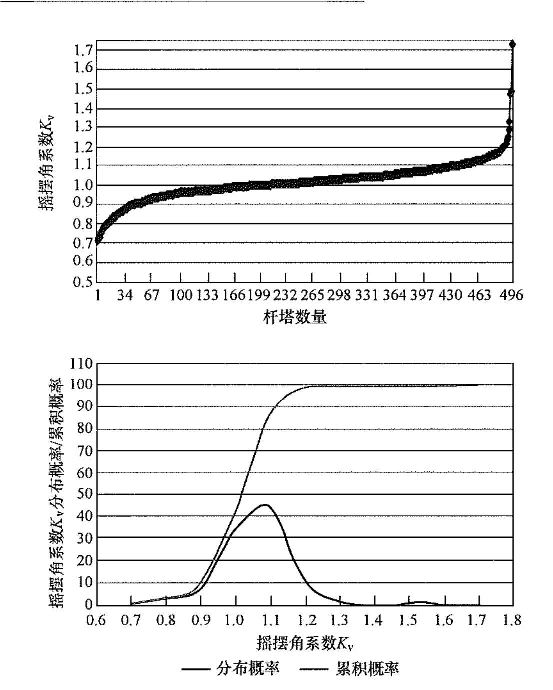


图 8-27 直线塔杆塔数量与摇摆角系数 K_v 的关系曲线及摇摆角系数 K_v 的分布概率及累积概率图

直线塔规划出的摇摆角系数（K_v）系列见表 8-8。

表 8-8 摇摆角系数 K_v、摇摆角角度、导线小弧垂及 V 型串夹角

塔型	摇摆角系数 K_v	摇摆角角度（°）/导线小弧垂（m）			V 型串夹角（°）
		大气过电压	操作过电压	工频过电压	
Ⅰ	0.80	9.27/0.55	18.07/0.55	48.23/0.30	90
Ⅱ	0.75	9.89/0.65	19.20/0.65	50.07/0.35	90
Ⅲ	0.70	10.59/0.75	20.46/0.75	52.00/0.40	95
Ⅳ	0.65	11.44/1.00	21.97/1.00	54.13/0.50	100

5. 杆塔规划结论

最终，该特高压输电线路杆塔规划结果见表 8-9～表 8-11。

表 8-9 直线塔及直线转角塔规划成果（一）

塔型	转角度数	塔高（m）	水平档距（m）	垂直档距（m）	档距范围（m）	备注
ZM1		44～56	460	600	200～700	
ZM2		50～59（62～65）	520	650	300～700	62～68m 塔高缩档验算
ZM3	0～3°	50～65（68～77）	580	700	300～700	转角度数及 68～77m 塔高缩档验算
ZM4		56～86	750	850	500～900	
ZMJ	3°～10°	50～56	500	700	300～550	

表 8-10 直线塔及直线转角塔规划成果（二）

塔型		摇摆角系数 K_v	摇摆角角度（°）/导线小弧垂（m）			V 型串夹角（°）
			大气过电压	操作过电压	工频过电压	
ZM1		0.80	9.27/0.55	18.07/0.55	48.23/0.30	85
ZM2		0.75	9.89/0.65	19.20/0.65	50.07/0.35	90
ZM3		0.70	10.59/0.75	20.46/0.75	52.00/0.40	95
ZM4		0.65	11.44/1.00	21.97/1.00	54.13/0.50	100
ZMJ	正向风	0.75	42.80/0.65	48.10/0.65	65.54/0.35	65+35
	反向风		30.02/0.65	22.73/0.65	−10.65/0.35	

表 8-11 耐张塔规划成果

塔型	转角度数	塔高（m）	水平档距（m）	垂直档距（m）	代表档距（m）
JT1	0～20°	36～45	550	–400～800	350～650
JT2	20°～40°	36～45	550	–400～800	350～650
JT3	40°～70°	36～45	550	–400～800	350～650
JT4	0～70°	48～54	550	–400～1000	350～650
JD	0～60°终端	45～57	400	500	0～500

第三节 杆塔设计荷载

一、杆塔结构的极限状态设计法

(一) 基本计算规定

（1）杆塔结构设计应采用以概率理论为基础的极限状态设计法，结构构件的可靠度采用可靠指标度量，极限状态设计表达式采用荷载标准值、材料性能标准值、几何参数标准值以及各种分项系数等表达。

（2）结构的极限状态是指结构或构件在规定的各种荷载组合作用下或在各种变形或裂缝的限值条件下，满足线路安全运行的临界状态。极限状态分为承载能力极限状态和正常使用极限状态。

1）承载能力极限状态：结构或构件达到最大承载力或不适合继续承载的变形。

2）正常使用极限状态：结构或构件的变形或裂缝等达到正常使用或耐久性能的规定限值。

（3）结构或构件的强度、稳定和连接强度，应按承载力极限状态的要求，采用荷载的设计值和材料强度的设计值进行计算；结构或构件的变形或裂缝，应按正常使用极限状态的要求，采用荷载的标准值和正常使用规定限值进行计算。

(二) 承载能力和正常使用极限状态计算表达式

（1）结构或构件的承载能力极限状态，应采用下列表达式，即

$$\gamma_0（\gamma_G \cdot S_{GK}+\psi\Sigma\gamma_{Qi} \cdot S_{QiK}）\leqslant R \qquad (8\text{-}9)$$

式中 γ_0——杆塔结构重要性系数，重要线路不应小于 1.1，临时线路取 0.9，其他线路取 1.0；

γ_G——永久荷载分项系数，对结构受力有利时不大于 1.0，不利时取 1.2，验算结构抗倾覆或抗滑移时取 0.9；

γ_{Qi}——第 i 项可变荷载的分项系数，取 1.4；

S_{GK}——永久荷载标准值的效应；

S_{QiK}——第 i 项可变荷载标准值的效应；

ψ——可变荷载组合系数，正常运行情况取 1.0，安装情况和不均匀覆冰情况取 0.9，断线情况取 0.9 或 0.75（110kV 及以上取 0.9；66kV 及以下耐张塔取 0.9，直线型杆塔取 0.75），验算及脱冰跳跃情况取 0.75；

R——结构构件的抗力设计值。

（2）结构或构件的正常使用极限状态，应采用下列表达式，即

$$S_{GK}+\psi\Sigma S_{QiK}\leqslant C \qquad (8\text{-}10)$$

式中 C——结构或构件的裂缝宽度或变形的规定限制值，mm。

（3）结构或构件承载力的抗震验算，应采用下列表达式，即

$$\gamma_G \cdot S_{GE}+\gamma_{Eh} \cdot S_{Ehk}+\gamma_{EV} \cdot S_{EVK}+\gamma_{EQ} \cdot S_{EQK}+\psi_{wE} \cdot S_{wk}\leqslant R/\gamma_{RE} \qquad (8\text{-}11)$$

式中 γ_{Eh}，γ_{EV}——水平、竖向地震作用分项系数，应按表 8-12 的规定采用。

γ_{EQ}——导、地线张力可变荷载的分项综合系数，取 $\gamma_{EQ}=0.5$；

S_{GE}——永久荷载代表值的效应；

S_{Ehk}——水平地震作用标准值的效应；

S_{EVK}——竖向地震作用标准值的效应；

S_{EQK}——导、地线张力可变荷载的代表值效应；

S_{wk}——风荷载标准值的效应；

ψ_{wE}——抗震基本组合中的风荷载组合系数，可取 0.3；

γ_{RE}——承载力抗震调整系数，应按表 8-13 确定。

表 8-12 地震作用分项系数

考虑地震作用的情况		γ_{Eh}	γ_{EV}
仅考虑水平地震作用		1.3	0
仅考虑竖向地震作用		0	1.3
同时考虑水平与竖向地震作用	水平地震作用为主时	1.3	0.5
	竖向地震作用为主时	0.5	1.3

表 8-13　　承载力抗震调整系数

材料	结构构件	承载力抗震调整系数
钢材	跨越塔	0.85
	除跨越塔以外的其他铁塔	0.80
	焊缝和螺栓	1.00
钢筋混凝土	跨越塔	0.90
	钢管混凝土杆塔	0.80
	钢筋混凝土杆	0.80
	各类受剪构件	0.85

二、杆塔设计荷载

作用在杆塔设计荷载按其性质可分为永久荷载、可变荷载和特殊荷载。

（1）永久荷载：导线及地线、绝缘子及其附件、杆塔结构、各种固定设备、基础以及土体等的重力荷载；拉线或纤绳的初始张力、土压力及预应力等荷载。

（2）可变荷载：风和冰（雪）荷载；导线、地线及拉线张力；安装检修的各种附加荷载；结构变形引起的次生荷载以及各种振动动力荷载。

导、地线张力是指正常最大风、覆冰、最低温条件下由代表档距所引起的导、地线张力；导、地线断线所引起的张力或不平衡张力；在舞动区由于导、地线舞动产生的不平衡张力；在山区或特殊地形地段，由于不均匀结冰所引起的不平衡张力；在重冰区，由于导、地线脱冰跳跃和不均匀覆冰产生的不平衡张力等。

（3）地震荷载：由地震引起的地震荷载。

上述各项荷载都可以根据计算需要，将它们分解成作用在杆塔上的横向荷载（横担方向）、纵向荷载（垂直横担方向）和垂直荷载（竖向）。

三、风荷载

(一) 风速取值

不同电压等级的设计风速重现期、基准高度和时距值按表 8-14 取值。

表 8-14　　设计风速重现期、基准高度及时距的取值

线路电压等级	重现期（年）	基准高度（m）	时距（min）
35kV、66kV	30	10	10
110～330kV	30		
110～330kV 大跨越	30		
500kV、750kV、±500kV、±660kV	50		
500kV、750kV、±500kV、±660kV 大跨越	50		
±800kV、1000kV	100		
±800kV、1000kV 大跨越	100		

注　1. 设计风速：66kV 及以下电压等级、110～330kV 输电线路不宜低于 23.5m/s；500kV 及以上电压等级输电线路不宜低于 27m/s。
2. 各级电压大跨越统计风速基准高度取离历年大风季节平均最低水位以上 10m。

(二) 风压高度变化系数

风压高度变化系数见表 8-15。

表 8-15　　风压高度变化系数 μ_z

离地面或海平面高度（m）	地面粗糙度类别			
	A	B	C	D
5	1.09	1.00	0.65	0.51
10	1.28	1.00	0.65	0.51
15	1.42	1.13	0.65	0.51
20	1.52	1.23	0.74	0.51
30	1.67	1.39	0.88	0.51
40	1.79	1.52	1.00	0.60
50	1.89	1.62	1.10	0.69
60	1.97	1.71	1.20	0.77
70	2.05	1.79	1.28	0.84
80	2.12	1.87	1.36	0.91
90	2.18	1.93	1.43	0.98

续表

离地面或海平面高度（m）	地面粗糙度类别			
	A	B	C	D
100	2.23	2.00	1.50	1.04
150	2.46	2.25	1.79	1.33
200	2.64	2.46	2.03	1.58
250	2.78	2.63	2.24	1.81
300	2.91	2.77	2.43	2.02
350	2.91	2.91	2.60	2.22
400	2.91	2.91	2.76	2.40
450	2.91	2.91	2.91	2.58
500	2.91	2.91	2.91	2.74
≥550	2.91	2.91	2.91	2.91

注　地面粗糙度类别：

A 类指近海面和海岛、海岸、湖岸及沙漠地区；

B 类指田野、乡村、丛林、丘陵以及房屋比较稀疏的乡镇和城市郊区；

C 类指有密集建筑群的城市市区；

D 类指有密集建筑群且房屋较高的城市市区。

（三）杆塔和基础的风压调整系数

1. 110kV 及以上架空输电线路杆塔风荷载调整系数

杆塔设计时，当杆塔全高不超过 60m，杆塔风荷载调整系数β_z（用于杆塔本身）应按表 8-16 的规定对全高采用一个系数；当杆塔全高超过 60m，杆塔风荷载调整系数β_z应按 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》采用由下到上逐段增大的数值，但其加权平均值对自立式铁塔不应小于 1.6，对单柱拉线杆塔不应小于 1.8。

表 8-16　　杆塔风荷载调整系数β_z
（用于杆塔本身）

杆塔全高 H（m）		20	30	40	50	60
β_z	单柱拉线杆塔	1.0	1.4	1.6	1.7	1.8
	其他杆塔	1.0	1.25	1.35	1.5	1.6

注　1. 中间值按插入法计算。

2. 对自立式铁塔，表中数值适用于高度与根开之比为 4～6。

2. 110kV 及以上架空输电线路基础风荷载调整系数

设计基础时，当杆塔全高不超过 60m，杆塔风荷载调整系数β_z应取 1.0；当杆塔全高超过 60m，宜采用由下到上逐段增大的数值，但其加权平均值对自立式铁塔不应小于 1.3。

3. 66kV 及以下架空输电线路杆塔和基础的风荷载调整系数

66kV 及以下架空输电线路和基础的风荷载调整系数应按表 8-17 取值。

表 8-17　　杆塔风荷载调整系数β_z
（用于 66kV 及以下架空输电线路）

部位	杆塔总高度（m）		
	<30	30～50	>50
塔身	1.0	1.2	1.5
基础	1.0	1.0	1.2

4. ±800kV 特高压直流、1000kV 特高压交流架空输电线路杆塔及基础风荷载调整系数

杆塔风压调整系数β_z，可参考表 8-18、表 8-19 取值。为方便计算也可按第 1 条规定执行。

根据 GB 50135—2006《高耸结构设计规范》关于塔架结构体型系数取值的规定，由钢管构件组成的塔架整体计算时的μ_s，按角钢塔架的μ_s乘以 0.6～0.8 采用。为计算方便，在 1000kV 特高压交流线路工程钢管塔的体型系数为 $0.85(1+\eta)$。

表 8-18　　单回路杆塔风荷载调整系数β_z

横担及地线支架高（m）	≤60						>60			
β_z	2.2						2.5			
身部分段高（m）	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
β_z	1.30	1.35	1.40	1.45	1.50	1.55	1.60	1.65	1.70	1.80

注　本表适用于±800kV 特高压直流、1000kV 特高压交流单回路杆塔。

表 8-19　　双回路杆塔风荷载调整系数β_z

横担及地线支架高（m）	≤90								
β_z	上横担 2.4，中横担 2.1，下横担 1.8								
身部分段高（m）	10	20	30	40	50	60	70	80	90
β_z	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45	1.50	1.55	1.60
横担及地线支架高（m）	>90								
β_z	上横担 2.5，中横担 2.3，下横担 2.0								
身部分段高（m）	100	110	120	130	140	150			
β_z	1.70	1.75	1.80	1.85	1.90	2.00			

注　本表适用于 1000kV 特高压交流双回路杆塔。

基础风压调整系数β_z，可参考化工塔架的设计经验，取对杆塔效应的 50%，即$\beta_{基}=(\beta_{杆塔}-1)/2+1$。考虑到使用上的方便，对 60m 以下杆塔取 1.0；对 60m 及以上杆塔取 1.3。

（四）导地线风荷载计算

导、地线风荷载的计算见第五章第一节。

（五）绝缘子串风荷载计算

绝缘子串风荷载的标准值w_I按式（8-12）计算，即

$$w_I = w_o \mu_z B_1 A_I \tag{8-12}$$

$$W_o = \frac{v^2}{1600} \tag{8-13}$$

式中　w_I——绝缘子串风荷载标准值，kN；

w_o——基准风压标准值，kN/m²；

A_I——绝缘子串承受风压面积计算值，m²；

μ_z——风压高度变化系数，见表 8-15；

B_1——覆冰时风荷载增大系数，5mm 冰区取 1.1，10mm 冰区取 1.2，15mm 冰区取 1.3，20mm 及以上冰区取 1.5～2.0；

v——基准高度时的计算风速，m/s。

（六）杆塔风荷载计算

作用在与风向相垂直的结构物表面的风荷载标准值用式（8-14）计算，即

$$W_s = W_0 \mu_z \mu_s B_2 A_s \beta_z \tag{8-14}$$

式中　W_s——杆塔风荷载标准值，kN；

μ_s——构件的体型系数，采用表 8-20；

B_2——杆塔构件覆冰风荷载增大系数，5mm 冰区取 1.1，10mm 冰区取 1.2，15mm 冰区取 1.6，20mm 冰区取 1.8，20mm 以上冰区取 2.0～2.5；

A_s——迎风面构件的投影面积计算值（m²）。

风荷载体形系数如表 8-20 所示。

表 8-20　　风荷载体形系数

序号	名称	结构体型及体型系数 μ_s
1	各种截面的杆件	$\mu_s=+1.3$

续表

序号	名称	结构体型及体型系数 μ_s
2	桁架	见下

2 桁架

(a)

单榀桁架的体型系数

$$\mu_{st} = \phi\mu_s$$

式中：μ_s 为桁架构件的体形系数，对型钢杆件按第 1 项采用，对圆杆件按第 4（b）项采用；

$\phi = A_n / A$ 为桁架的挡风系数；

A_n 为桁架杆件和节点挡风的净投影面积；

$A = hl$ 为桁架的轮廓面积。

(b)

n 榀平行桁架的整体体形系数

$$\mu_{stw} = \mu_{st}\frac{1-\eta^n}{1-\eta}$$

式中：μ_{st} 为单榀桁架的体形系数；

η 系数按下表采用。

≤0.1	1.00	1.00	1.00	1.00
0.2	0.85	0.90	0.93	0.97
0.3	0.66	0.75	0.80	0.85
0.4	0.50	0.60	0.67	0.73
0.5	0.33	0.45	0.53	0.62
0.6	0.15	0.30	0.40	0.50

3 塔架

(a) 角钢塔架整体计算时的体型系数 μ_s 按下表采用。

挡风系数	方形			三角形风向③④⑤
	风向①	风向②		
		单角钢	组合角钢	
≤0.1	2.6	2.9	3.1	2.4
0.2	2.4	2.7	2.9	2.2
0.3	2.2	2.4	2.7	2.0
0.4	2.0	2.2	2.4	1.8
0.5	1.9	1.9	2.0	1.6

(b) 管子及圆钢塔架整体计算时的体型系数 μ_s：

当 $\mu_z w_0 d^2$ 不大于 0.002 时，μ_s 按角钢塔架的 μ_s 值乘以 0.8 采用；

当 $\mu_z w_0 d^2$ 不小于 0.015 时，μ_s 按角钢塔架的 μ_s 值乘以 0.6 采用。

续表

<table>
<tr><th>序号</th><th>名称</th><th>结构体型及体型系数 μ_s</th></tr>
<tr><td>4</td><td>圆形截面构筑物（包括烟囱、桅杆等）</td><td>

（a）局部计算时表面分布的体型系数按下表采用。

α	$H/d \geqslant 25$	$H/d=7$	$H/d=1$
0°	+1.0	+1.0	+1.0
15°	+0.8	+0.8	+0.8
30°	+0.1	+0.1	+0.1
45°	−0.9	−0.8	−0.7
60°	−1.9	−1.7	−1.2
75°	−2.5	−2.2	−1.5
90°	−2.6	−2.2	−1.7
105°	−1.9	−1.7	−1.2
120°	−0.9	−0.8	−0.7
135°	−0.7	−0.6	−0.5
150°	−0.6	−0.5	−0.4
165°	−0.6	−0.5	−0.4
180°	−0.6	−0.5	−0.4

（b）整体计算时体型系数按下表采用。

截面		风向	H/d		
			25	7	1
正方形		垂直于一边	2	1.4	1.3
		沿对角线	1.5	1.1	1.0
正六及正八边形		任意	1.4	1.2	1.0
圆形	粗糙	任意	0.9	0.8	0.7
	光滑		0.6	0.5	0.45

注（a）项局部计算用表中的值适用于 $\mu_z w_0 d^2 > 0.02$ 的表面光滑情况，其中 w_0 以 kN/m² 计，d 以 m 计；

（b）项表中光滑系指钢、混凝土等圆形结构的表面情况；粗糙系指结构表面有凸出肋条的情况；整体计算用表中的中间值按线性插值法计算。

</td></tr>
</table>

对于平面桁架的风荷载，应按式（8-15）计算，即

$$\left.\begin{aligned} w_s &= W_0\mu_z\mu_{st}B_2A\beta_z \\ \mu_{st} &= \phi\mu_s \\ \phi &= \frac{\sum A_c}{A} \end{aligned}\right\} \quad (8\text{-}15)$$

式中 μ_{st} ——平面桁架体型系数，采用表 8-20；

ϕ ——平面桁架的挡风系数；

$\sum A_c$ ——桁架杆件投影面积之和，应考虑节点板引起的面积增加，m²；

A ——桁架轮廓面积，m²。

对空间桁架、塔架的风荷载计算应按表 8-20 第 2、第 3 栏的规定计算。

计算风压时，一般应分段计算，每段高度不宜超过 10m，计算时宜与杆塔主材规划的长度相对应，杆塔分段风荷载的合力假定作用在该段的重心处。

（七）角度风作用时风荷载计算

杆塔应计算最不利风向作用，悬垂型杆塔应计算与线路方向成 0°、45°（或 60°）及 90°，即顺线路方向、斜向、垂直方向的三种基本风速的风向；一般耐张型杆塔可只计算 90° 和 45° 两种基本风速的风向；终端杆塔除计算 90° 和 45° 两种基本风速的风向外，还需计算 0° 基本风速的风向；悬垂转角杆塔和小角度耐张转角杆塔还应计算与导、地线张力的横向分力相反的风向。此时电线风荷载及塔身风荷载应按以下规定计算。

1. 电线风荷载

当风向与电线方向之间的夹角为 θ 时，垂直于电线方向的风荷载 W_x 可近似地按式（8-16）计算，即

$$W_x = w\sin^2\theta \quad (8\text{-}16)$$

式中 W——风向与电线垂直时的电线风荷载标准值，N，按式（5-9）计算。

根据国外试验结果，在斜向风作用下顺线路方向的风荷载分量 w_Y 甚小，为确保杆塔的纵向强度，规定采用表 8-21 数值。

2. 杆塔风荷载

在角度风作用下，塔上各杆件的轴线方向与风向之间的夹角无一定规律，因此要精确计算其风荷载是十分困难的，一般可依据风动试验的结果，选取适当的系数进行计算。可按表 8-21 的规定计算杆塔各个方向的风荷载分量。角度风作用示意图如图 8-28 所示。

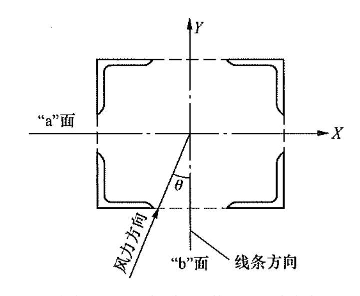


图 8-28 角度风作用示意图

表 8-21 角度风作用时风荷载分配表

风向角 θ（°）	线条风荷载		塔身风荷载		水平横担风荷载	
	X	Y	X	Y	X	Y
0	0	$0.25W_x$	0	W_{sb}	0	W_{sc}
45	$0.5W_x$	$0.15W_x$	$K_1\times0.424\times(W_{sa}+W_{sb})$	$K_1\times0.424\times(W_{sa}+W_{sb})$	$0.4W_{sc}$	$0.7W_{sc}$
60	$0.75W_x$	0	$K_1\times(0.747W_{sa}+0.249W_{sb})$	$K_1\times(0.431W_{sa}+0.144W_{sb})$	$0.4W_{sc}$	$0.7W_{sc}$
90	W_x	0	W_{sa}	0	$0.4W_{sc}$	0

注 1. X、Y 分别为垂直与顺导、地线方向风荷载的分量；
2. W_x 为风垂直导、地线方向吹时导、地线风荷载标准值，按式（5-9）计算；
3. W_{sa}、W_{sb} 分别为风垂直于"a"面及"b"面吹时，塔身风荷载标准值，按式（8-14）计算；
4. W_{sc} 为风垂直于横担正面吹时，横担风荷载标准值，按式（8-14）计算；
5. K_1 为角钢挡风面积增大系数：对单角钢断面取 1.0，对组合角钢断面取 1.1。

四、电线垂直荷载与杆塔自重荷载

（一）电线的垂直荷载

电线的垂直荷载按照式（8-17）计算，即

$$G = L_V qn + G_1 + G_2 \quad (8\text{-}17)$$

式中 G ——电线的垂直荷载标准值，N；

L_V ——垂直档距，m；

q ——电线单位长度的重力，N/m；

G_1、G_2 ——绝缘子、金具、防振锤、重锤等的重力，N；

n ——地线或每相（每极）导线的分裂根数。

（二）杆塔自重荷载

杆塔自重荷载一般可根据设计经验，参照设计条

件相近的杆塔资料做出假定。也可通过计算软件求得计算塔重，但计算塔重不包括辅助材、连接板等质量，塔的实际质量还需乘以自重增大系数，此系数一般取1.3～1.8。

五、电线不平衡张力及其角度合力荷载

电线在各种运行情况、安装情况下的张力按第五章计算。但该张力是顺着电线方向的，在计算杆塔受力时需将它们分解成顺着杆塔横担方向的横向荷载（称角度荷载）和垂直于铁塔横担的纵向荷载（称不平衡张力），见图8-29和图8-30。

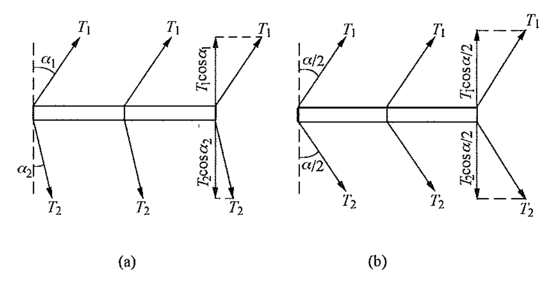


图 8-29 电线不平衡张力计算示意图

（a）杆塔两侧线路转角不同情况；

（b）杆塔两侧线路转角相同情况

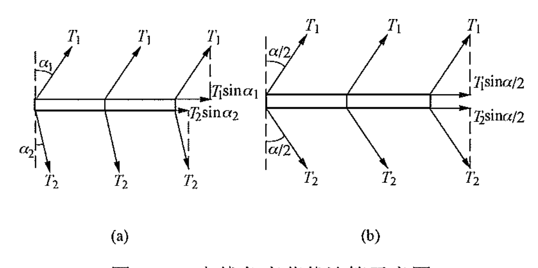


图 8-30 电线角度荷载计算示意图

（a）杆塔两侧线路转角不同情况；

（b）杆塔两侧线路转角相同情况

（一）电线不平衡张力

由图8-29所示，按式（8-18）计算，即

$$\Delta T = T_1\cos\alpha_1 - T_2\cos\alpha_2 \tag{8-18}$$

若 $\alpha_1=\alpha_2=\alpha/2$，即横担方向与线路转角的内角分线相重合，则

$$\Delta T = (T_1 - T_2)\cos(\alpha/2) \tag{8-19}$$

式中 ΔT ——电线不平衡张力标准值，N；

T_1、T_2 ——杆塔前后两档的电线张力标准值，N；

α ——线路转角，（°）；

α_1、α_2 ——电线与杆塔横担垂线之间的夹角，（°）。

对直线杆塔，因杆塔前后两档内的电线张力相等，故一般情况下没有不平衡张力，即 $\Delta T=0$。

（二）电线角度荷载

由图8-30所示，按式（8-20）计算，即

$$\left.\begin{aligned} F_{s1} &= T_1\sin\alpha_1 \\ F_{s2} &= T_2\sin\alpha_2 \end{aligned}\right\} \tag{8-20}$$

式中 F_{s1}、F_{s2} ——杆塔前后两档电线角度荷载标准值，N。

当 $\alpha_1=\alpha_2=\alpha/2$ 时，则

$$\left.\begin{aligned} F_{s1} &= T_1\sin(\alpha/2) \\ F_{s2} &= T_2\sin(\alpha/2) \end{aligned}\right\} \tag{8-21}$$

对直线塔，电线角度荷载一般为零，但对悬垂转角塔、换位塔和耐张、转角塔，都需计算这个荷载。

（三）断线张力荷载

（1）110kV 及以上架空输电线路10mm及以下的冰区导、地线的断线张力（或分裂导线纵向不平衡张力）的取值应符合表8-22规定的导、地线最大使用张力的百分数值，垂直冰荷载取100%设计覆冰荷载。

表 8-22 10mm 及以下冰区导线、地线断线张力（或分裂导线纵向不平衡张力）取值表 %

地形	地线	悬垂型杆塔			耐张型杆塔	
		单导线	双分裂导线	双分裂以上导线	单导线	双分裂及以上导线
平丘	100	50	25	20	100	70
山地	100	50	30	25	100	70

（2）110kV 及以上架空输电线路中冰区导、地线的断线张力（或分裂导线纵向不平衡张力）的取值应符合表8-23规定的导、地线最大使用张力的百分数值，垂直冰荷载取100%设计覆冰荷载。

表 8-23 中冰区导线、地线断线张力（或分裂导线纵向不平衡张力）取值表 %

冰区（mm）	悬垂型杆塔				耐张型杆塔		
	单导线	双分裂导线	双分裂以上导线	地线	单导线	双分裂及以上导线	地线
15	50	40	35	100	100	70	100
20	50	50	45	100	100	70	100

（3）110kV 及以上架空输电线路重冰区导、地线断线张力（或分裂导线纵向不平衡张力）取值不应低于表8-24规定的导、地线最大使用张力的百分数值。

表 8-24　重冰区导线、地线断线张力（或分裂导线纵向或不平衡张力）取值表　%

冰区	悬垂型杆塔		耐张型杆塔		
	导线	地线	单导线	双分裂及以上导线	地线
20mm	55	100	100	75	100
30mm	60	100	100	80	100
40mm	65	100	100	85	100
50mm	70	100	100	90	100

（4）66kV 及以下架空输电线路断线工况下，导线或地线张力应符合下列规定。

1）悬垂杆塔。

a）单导线和地线按表 8-25 的规定采用；

b）分裂导线平地应取 1 根导线最大使用张力的 40%，山地应取 50%；

c）针式绝缘子杆塔的导线断线张力宜大于 3.0kN。

表 8-25　悬垂杆塔单导线和地线的断线张力取值表　%

导线或地线种类		断线张力（最大使用张力的百分数）		
		混凝土杆 钢管混凝土杆	拉线塔	自立塔
地线		15～20	30	50
导线截面（mm^2）	95 及以下	30	30	40
	120～185	35	35	40
	120 及以上	40	40	50

2）耐张塔。断线工况下，耐张型杆塔的地线张力应取地线最大使用张力的 80%，导线张力应取导线最大使用张力的 70%。

重冰地区各类杆塔的断线工况应按覆冰、无风、气温为-5℃计算，断线工况的覆冰荷载不应小于运行工况计算覆冰荷载的 50%。

（5）如果钢筋混凝土杆塔受扭强度满足工程需要，可不采用转动横担或变形横担，如果采用转动横担或变形横担，其启动力应满足运行和施工的安全要求。一般 110kV 线路采用标准值 2～3kN；220kV 线路采用标准值 5～6kN。

（四）不均匀覆冰荷载

（1）110kV 及以上架空输电线路 10mm 冰区不均匀覆冰情况的导、地线的不平衡张力的取值应符合表 8-26 规定的导、地线最大使用张力的百分数值，垂直冰荷载取 75%设计覆冰荷载。相应气象条件按-5℃、10m/s 风速的气象条件计算。

表 8-26　10mm 冰区不均匀覆冰情况的导、地线不平衡张力取值表　%

悬垂型杆塔		耐张型杆塔	
导线	地线	导线	地线
10	20	30	40

（2）110kV 及以上架空输电线路重覆冰区不均匀覆冰情况的导、地线的不平衡张力的取值可按表 8-27 覆冰率计算，垂直冰荷载取不小于 75%设计覆冰荷载。相应气象条件按-5℃、10m/s 风速的气象条件计算。

表 8-27　重覆冰区不均匀覆冰情况的导、地线不平衡张力覆冰率取值表　%

线路等级	悬垂型杆塔		耐张型杆塔	
	一侧	另一侧	一侧	另一侧
500kV 以上及重要的 330kV	100	20	100	0
330kV 及重要的 220kV	100	30	100	15
220kV 及 110kV	100	40	100	30

中冰区不均匀覆冰情况的导、地线的不平衡张力的取值除按表 8-27 的覆冰率进行计算外，具体取值不应低于表 8-28 规定的导、地线最大使用张力的百分数值。

表 8-28　中冰区不均匀覆冰的导、地线不平衡张力取值表　%

冰区（mm）	悬垂型杆塔		耐张型杆塔	
	导线	地线	导线	地线
15	15	25	35	45
20	20	30	40	50

重冰区不均匀覆冰情况的导、地线的不平衡张力的取值除按表 8-27 的覆冰率进行计算外，具体取值不应低于表 8-29 规定的导、地线最大使用张力的百分数值。

表 8-29　重冰区不均匀覆冰的导、地线不平衡张力取值表　%

冰区（mm）	悬垂型杆塔		耐张型杆塔	
	导线	地线	导线	地线
20	25	46	42	54
30	29	50	46	58
40	33	54	50	63
50	38	58	54	67

（3）66kV 及以下架空输电线路重冰地区，各类杆塔应按所有导线及地线不均匀脱冰，一侧覆冰 100%，另一侧覆冰不大于 50%计算不平衡张力荷载。对直线杆塔，可按导线和地线不同时发生不均匀脱冰验算。对耐张型杆塔，可按导线和地线同时发生不均匀脱冰验算。

六、直线杆塔安装荷载

直线杆塔的安装，需要考虑吊线作业和锚线情况下的荷载；对钢筋混凝土电杆还要考虑整体吊装时的强度和稳定。

（一）吊线荷载

指线路在施工和维护中安装导线、地线或附件时，将其从地面提升到塔上或从塔上放到地面的作业过程中作用于杆塔的荷载。提升导、地线的荷载一般仍按常规 2 倍起吊考虑。如果考虑避免安装荷载（包括检修荷载）过多地控制杆件选材，起吊时采用转向滑轮等措施，将起吊荷载控制在导、地线质量的 1.5 倍以内，但是，应在设计文件中加以说明，如图 8-31 所示。

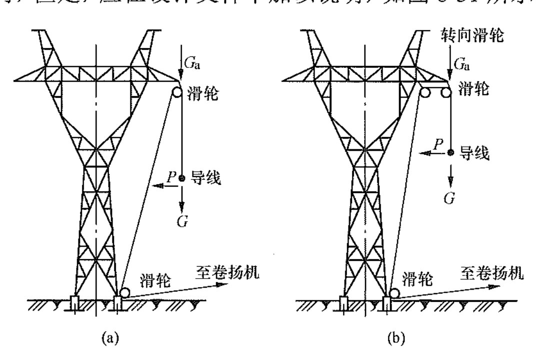


图 8-31 直线杆塔起吊导线示意图
（a）双倍挂线方式；（b）转向滑车挂线方式

采用转向滑车挂线时作用在滑车悬挂点的荷载有

$$\left.\begin{aligned}\sum G&=(1.5\gamma_G KG+\gamma_Q\psi G_a)\times n\\ \sum H&=\gamma_Q\psi w_k n\end{aligned}\right\}\qquad(8\text{-}22)$$

式中 $\sum G$ ——垂直荷载设计值，N；

$\sum H$ ——水平荷载设计值，N；

γ_G ——永久荷载分项系数；

γ_Q ——可变荷载分项系数；

ψ ——可变荷载组合系数；

K ——动力系数，一般取 1.1；

G ——被吊电线、绝缘子及金具的重力，N；

G_a ——附加荷载，按照可变荷载计列，N，见表 8-30；

w_k ——风荷载标准值，N；

n ——垂直荷载和横向荷载的前后挂点分配系数。

采用双倍挂线起吊导线时（见图 8-31），作用在滑车悬挂点的垂直荷载设计值为

$$\sum G=(2K\gamma_G G+\gamma_Q\psi G_a)\times n\qquad(8\text{-}23)$$

横向荷载即为风荷载。

（二）锚线荷载

随着施工机械化程度的提高，在高压架空输电线路施工中采用了张力放线机放线、紧线，由于施工场地的要求，放线、紧线往往不一定在耐张、转角杆塔上进行，这时就会出现在直线杆塔上紧线、锚线等作业。也就是在直线杆塔的相邻两档中，一档的电线已按要求架好，相邻档电线用临时拉线锚在地上，如图 8-32 所示。

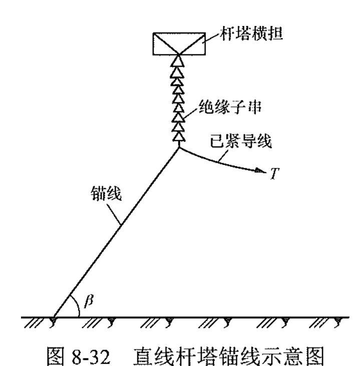


图 8-32 直线杆塔锚线示意图

作用在横担上的纵向不平衡张力、垂直荷载及横向荷载分别为

$$\left.\begin{aligned}\Delta T&=\gamma_Q\psi TK(1-\cos\beta)\\ \sum G&=(\gamma_G G+\gamma_Q\psi TK\sin\beta+\gamma_Q\psi G_a)n\\ \sum H&=\gamma_Q\psi nP\end{aligned}\right\}\qquad(8\text{-}24)$$

式中 ΔT ——纵向不平衡张力设计值，N；

$\sum G$ ——垂直荷载设计值，N；

$\sum H$ ——横向荷载设计值，N；

γ_G ——永久荷载分项系数；

γ_Q ——可变荷载分项系数；

ψ ——可变荷载组合系数；

T ——安装时导线或地线的张力标准值，N；

β ——锚线钢绳对地夹角，（°）；

K ——动力系数，电线正锚时取 1.1，已锚好时取 1.0；

n ——垂直荷载和横向荷载的分配系数；

G、P ——分别为被锚电线的垂直荷载和横向荷载标准值，N；

G_a ——附加荷载正锚时取值，N，见表 8-30，已锚好时取 0kN。

表 8-30 附加荷载标准值 kN

电压等级（kV）	导线		地线		跳线
	悬垂杆塔	耐张杆塔	悬垂杆塔	耐张杆塔	
110	1.5	2.0	1.0	1.5	1.0
220～330	3.5	4.5	2.0	2.0	2.0
500～750	4.0	6.0	2.0	2.0	3.0
±800、1000	8.0	12.0	4.0	4.0	6.0

注 66kV 及以下等级线路杆塔的附加荷载标准值如无实际经验时可参照 110kV 执行。

七、耐张杆塔安装荷载

在一般架空输电线路施工中，在耐张、转角杆塔上的施工安装主要有两种，即挂线和牵引。此时对耐张转角杆塔应考虑挂线和牵引荷载。

（一）挂线荷载

挂线是指按设计要求的弧垂，把电线与绝缘子串连接后挂到杆塔上去的作业过程（见图 8-33）。电线挂到塔上后松开牵引钢绳，使杆塔受到一个突加的张力荷载。在实际施工中，这种操作一般只能逐根（相）进行。由于荷载较大，杆塔设计中可考虑设置临时拉线平衡部分荷载。

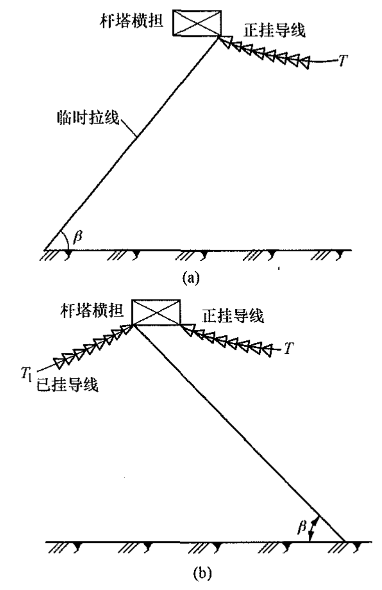


图 8-33 耐张、转角杆塔挂线示意图
（a）相邻档的电线未挂；（b）相邻档的电线已挂好

此时作用在杆塔挂点上的荷载分别为

$$\left.\begin{aligned}\sum H &= \gamma_Q\psi[nP+(KT-T_0)\sin\alpha_1]\\ \Delta T &= \gamma_Q\psi(KT-T_0)\cos\alpha_1\\ \sum G &= n\gamma_G G+\gamma_Q\psi(T_0\tan\beta+G_a)\end{aligned}\right\}\quad(8\text{-}25)$$

式中 $\sum G$ ——垂直荷载设计值，N。

$\sum H$ ——横向荷载设计值，N。

ΔT ——纵向不平衡张力设计值，N。

γ_G ——永久荷载分项系数。

γ_Q ——可变荷载分项系数。

ψ ——可变荷载组合系数。

n ——电线垂直荷载和横向荷载在该挂点上的分配系数。

P、G ——该根（相）电线的横向荷载和垂直荷载标准值，N。

K ——动力系数，一般取 1.1。

T ——分配到该挂点的电线安装张力标准值，N。

T_0 ——临时拉线平衡的电线张力，500kV 以下杆塔临时拉线平衡导、地线张力的 30%，500kV 及以上杆塔，4 分裂导线的临时拉线平衡导线张力标准值取 30kN，6 分裂及以上导线的临时拉线平衡导线张力标准值取 40kN，地线临时拉线平衡地线张力标准值取 5.0kN 或 10.0kN（用于 800kV 和 1000kV 等级）。如有特殊取值，设计时须予与明确，挂点上无临时拉线时取 0kN。

α_1 ——电线方向与横担垂线方向间的夹角，当横担方向置于线路转角内角平分线上时 $\alpha_1=\alpha/2$（α 为线路转角），（°）。

β ——临时拉线对地夹角，不应大于 45°，其方向为顺导线、地线线条反方向布置。

G_a ——附加荷载，见表 8-30。

（二）牵引荷载

牵引电线荷载是指架线过程中通过设在杆塔上的滑车，把电线拉紧到设计张力的过程，有两种情况，如图 8-34 所示。

（1）相邻档电线未挂时，作用在杆塔挂点上的荷载分别为

$$\left.\begin{aligned}\sum H &= \gamma_Q\psi\{nP+[KT(1-\cos\gamma)-T_0]\sin\alpha_1\}\\ \Delta T &= \gamma_Q\psi[KT(1-\cos\gamma)-T_0]\cos\alpha_1\\ \sum G &= n\gamma_G G+\gamma_Q\psi(T_0\tan\beta+KT\sin\gamma+G_a)\end{aligned}\right\}\quad(8\text{-}26)$$

（2）相邻档电线已经挂完时，作用在杆塔挂点上的荷载分别为

$$\left.\begin{aligned}\sum H &= \gamma_Q \psi[nP + KT(1-\cos\gamma)\sin\alpha_1] \\ \Delta T &= K\gamma_Q \psi T(1-\cos\gamma)\cos\alpha_1 \\ \sum G &= n\gamma_G G + \gamma_Q \psi(KT\sin\gamma + G_a)\end{aligned}\right\} \quad (8\text{-}27)$$

式中 γ ——牵引钢绳对地夹角，不宜大于 20°；

T_1 ——临时拉线的初张力，$T_0 = T_1\cos\beta$；

其他符号含义与式（8-25）相同。

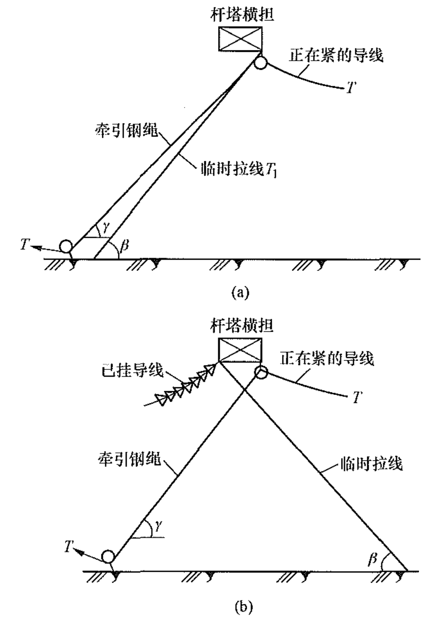


图 8-34 耐张、转角杆塔紧线时的荷载示意图
（a）相邻档电线尚未架设；
（b）相邻档电线已经挂完

以上各荷载均系作用在操作的那根（相）电线挂线点上的荷载，其余挂线点上的荷载应根据实际情况另行计算，如果相邻档电线已经挂完，其荷载可参照正挂电线荷载计算公式，此时张力计算不应考虑冲击系数 K 的影响。

八、验算情况荷载

验算情况是针对稀有气象条件、地震等特殊情况。

位于基本地震烈度为九度及以上地区的各类杆塔均应进行抗震验算。验算条件：有风（风荷载最大设计值的 30%），无冰、未断线。

各类杆塔的验算冰荷载情况，按验算冰厚、–5°C、10m/s 风，所有导、地线同时同向有不平衡张力。

重覆冰线路各垂直档距系数（垂直档距与水平档距之比）小于 0.8 的杆塔，应按导、地线脱冰跳跃和不均匀覆冰时产生的上拔力校验导线横担和地线支架，导线上拔力取最大使用张力的 5%～10%，地线上拔力可取最大使用张力的 5%。相邻塔位高差较大时，还应校验耐张型杆塔横担受扭情况。

九、荷载组合

杆塔设计中一般需要考虑线路在正常运行、施工操作、事故断线及特殊荷载等四种情况下杆塔的强度、稳定及变形。

（一）各种荷载组合时的气象条件

各种荷载组合时的气象条件见表 8-31。

表 8-31 各种荷载组合时的气象条件

荷载组合		气象条件			备注
		风速（m/s）	冰厚（mm）	气温（℃）	
正常运行	最大风	最大	0	相应	
	最大覆冰	相应	最大	相应	
	最低气温	0	0	最低	
施工维护	安装、检修	10	0	相应	
事故	断导线	0	最大	–5	
	断地线	0	最大	–5	
特殊工况	不均匀覆冰	10	最大	相应	
	验冰	10	相应	相应	
	脱冰跳跃	10	最大	相应	
	地震	最大	0	相应	最大风组合系数取 0.3，详见式（8-11）
	舞动	15	5	–5	3 级舞动

注 事故工况，当实际工程无冰时，应按–5℃、无冰、无风计算。

（二）荷载组合系数

各种荷载组合下的组合系数详见式（8-9）。

（三）荷载组合的基本原则

各类杆塔均应计算线路在正常运行情况、断线情况、不均匀覆冰情况和安装情况下的荷载组合，必要时尚应验算地震等稀有情况下的荷载组合，其设计基本原则如下。

1. 正常运行情况

（1）最大风、无冰、未断线（包括最小垂直荷载和最大水平荷载组合）。按最不利风向组合；

（2）设计覆冰、相应风速及气温、未断线；

（3）最低气温、无冰、无风、未断线（适用于终端和转角杆塔）。

2. 悬垂型杆塔的断线情况

（1）对于 110kV 及以上架空输电线路悬垂型杆塔（不含大跨越悬垂型杆塔）的断线情况，应按–5°C、有

冰、无风的气象条件，计算下列荷载组合：

1）单回路杆塔：单导线断任意一相（极）导线（分裂导线任意一相导线有纵向不平衡张力），地线未断；断任意一根地线，导线未断。

2）双回路杆塔：同一档内，单导线断任意两相（极）导线［分裂导线任意两相（极）导线有纵向不平衡张力］，地线未断；同一档内，断一根地线，单导线断任意一相（极）导线［分裂导线任意一相（极）导线有纵向不平衡张力］。

3）多回路杆塔：同一档内，单导线断任意三相（极）导线［分裂导线任意三相（极）导线有纵向不平衡张力］，地线未断；同一档内，断一根地线，单导线断任意两相（极）导线［分裂导线任意两相（极）导线有纵向不平衡张力］。

（2）对于 66kV 及以下架空输电线路悬垂型杆塔的断线情况，计算下列荷载组合：

1）单回路和双回路杆塔断一根导线、地线未断、无风、无冰；

2）多回路杆塔，同档断不同相的二根导线、地线未断、无风、无冰；

3）断一根地线、导线未断、无风、无冰。

3. 耐张型杆塔的断线情况

（1）对于 110kV 及以上架空输电线路耐张型杆塔的断线情况应按−5℃、有冰、无风的气象条件，计算下列荷载组合：

1）单回路和双回路杆塔。

a）交流线路：同一档内，单导线断任意两相导线（分裂导线任意两相导线有纵向不平衡张力）、地线未断；同一档内，断任意一根地线，单导线断任意一相导线（分裂导线任意一相导线有纵向不平衡张力）。

b）单回路直流线路：同一档内，断任意一根地线，单导线断任意一极导线（分裂导线任意一极导线有纵向不平衡张力）。

c）双回路直流线路：同一档内，单导线断任意两极导线（分裂导线任意两极导线有纵向不平衡张力）、地线未断；同一档内，断任意一根地线，单导线断任意一极导线（分裂导线任意一极导线有纵向不平衡张力）。

2）多回路杆塔：同一档内，单导线断任意三相（极）导线［分裂导线任意三相（极）导线有纵向不平衡张力］、地线未断；同一档内，断任意一根地线，单导线断任意两相（极）导线［分裂导线任意两相（极）导线有纵向不平衡张力］。

3）对于 1000kV 架空输电线路杆塔尚应考虑同一档内，断两根地线，导线无纵向平衡张力情况。

（2）对于 66kV 及以下架空输电线路耐张型杆塔的断线情况应计算下列荷载组合：

1）单回路杆塔，同档断两相导线；双回路或多回路杆塔，同档断导线的数量为杆塔上全部导线数量的 1/3；终端塔断剩两相导线、地线未断、无风、无冰；

2）断一根地线、导线未断、无风、无冰。

4. 悬垂杆塔的安装情况

（1）有一根地线进行挂线作业，另一根地线尚未架设或已经架设，导线均未架设；

（2）有一相导线进行挂线作业，其余导线尚未架设或已经架设的最不利组合，地线已经架设完毕；

（3）部分或全部电线进行锚线作业。

5. 耐张型杆塔的安装情况

（1）在一档内有一根地线正在进行挂线或牵引作业，其余地线已经架设或尚未架设，导线尚未架设；相邻档内的导线、地线已经架设或尚未架设。

（2）在一档内有一相导线正在进行挂线或牵引作业，其余导线已经架设或尚未架设，地线已经架设完毕；相邻档内的导线、地线已经架设或尚未架设。

（3）在两档内的导、地线安装完毕，正安装跳线串。

6. 不均匀覆冰情况

各类杆塔不均匀覆冰的不平衡张力应计算下列荷载组合：

（1）10mm 冰区：所有导、地线同时同向有不均匀覆冰的不平衡张力；

（2）重覆冰区：

1）所有导、地线同时同向有不均匀覆冰的不平衡张力；

2）所有导、地线同时不同向有不均匀覆冰的不平衡张力。

（3）对于 66kV 及以下等级线路杆塔，轻冰区不考虑不均匀覆冰工况；重冰地区各类杆塔应考虑所有导、地线同时同向有不均匀覆冰的不平衡张力。

7. 验冰情况

所有导、地线同时同向有不平衡张力。鉴于验算覆冰荷载出现概率很小，故不再考虑断线和最大扭矩的组合情况。

8. 脱冰跳跃情况

按本章第三节验算情况荷载等相关内容进行计算。

9. 地震情况

按本章第三节杆塔结构的极限状态设计法等相关内容进行计算。

相应的气象条件见表 8-31。

10. 舞动情况

在 3 级舞动区，线路杆塔横担设计宜增加舞动校验工况组合：风速 15m/s，冰厚 5mm，气温−5℃，风向 90°，组合系取 0.9。

11. 其他情况

计算曲线型杆塔时，应计算沿高度方向不同时出现最大风速的不利情况，即埃菲尔效应。

各类杆塔在断线情况下的断线张力（或分裂导线纵向不平衡张力），以及不均匀覆冰情况下的不平衡张力均应按静态荷载计算。

防串倒的加强型悬垂型杆塔，除按常规悬垂型杆塔工况计算外，还应按所有导、地线同侧有断线张力（或分裂导线纵向不平衡张力）计算。

根据初步设计批准的设计原则，实际工程推荐的双回路或多回路塔型是否有分期架设的情况；是否采用不同导线、地线情况；是否采用殊塔型，如单相塔、F 型塔、分歧塔及换位塔等，设计者应根据工程相应的要求，需考虑运行、安装、不均匀覆冰、事故、舞动等最不利工况组合进行铁塔设计。

（四）荷载组合实例

1. 500kV 交流线路铁塔

（1）单回路酒杯型直线塔荷载的基本组合见表 8-32。

表 8-32　单回路酒杯型直线塔荷载的基本组合

荷载组合		组合描述	
运行情况	大风	1	90° 大风
		2	60° 大风
		3	45° 大风
		4	0° 大风
		5	90° 大风最小垂直档距
		6	60° 大风最小垂直档距
		7	45° 大风最小垂直档距
		8	0° 大风最小垂直档距
	覆冰	9	90° 风
安装情况	吊装	10	吊装左地线
		11	左地线已吊，吊装右地线
		12	地线已吊，吊装中导线
		13	地线、中导线已吊，吊装左导线
		14	地线、中导线、左导线已吊，吊装右导线
		15	地线已吊，吊装左导线
		16	地线、左导线已吊，吊装中导线
	锚线	17	正锚左地线
		18	左地线已锚，正锚右地线
		19	地线已锚，正锚中导线
		20	地线、中导线已锚，正锚左导线
		21	地线、左导线、中导线已锚，正锚右导线
		22	地线已锚，正锚左导线
		23	地线、左导线已锚，正锚中导线
断线情况		24	断左地线
		25	中导线有纵向不平衡张力
		26	左导线有纵向不平衡张力
不均匀覆冰情况		27	90° 风，最大弯矩

注 1. 本表所列工况组合为杆塔荷载的基本组合；
2. 安装情况仅考虑 90° 风情况；
3. 中、重冰区杆塔需计算不均匀覆冰最大扭的工况；
4. 验算覆冰工况按规范执行；
5. 直线塔计算时需考虑导线单、双挂点情况；
6. 安装导线时必须同时使用横担前后两组施工挂孔，以保证铁塔受力均匀；
7. 考虑到工程各设计标段可能发生的特殊情况，杆塔荷载组合包括但不仅限于以上工况。

（2）单回路干字型转角塔荷载的基本组合见表 8-33。

表 8-33 单回路干字型转角塔荷载的基本组合

荷载组合		组合描述	
运行情况（大、小转角）	大风	1	90°风，两侧大张力
		2	90°风，前侧大张力，后侧小张力
		3	90°风，前侧大张力，后侧上拔
		4	45°风，两侧大张力
		5	45°风，前侧大张力，后侧小张力
		6	45°风，前侧大张力，后侧上拔
		7	90°反向风，两侧大张力
		8	90°反向风，前侧大张力，后侧小张力
	覆冰	9	90°风，两侧大张力
		10	90°风，前侧大张力，后侧小张力
		11	90°风，前侧大张力，后侧上拔
	低温	12	最低气温工况，两侧大张力
		13	最低气温工况，前侧大张力，后侧小张力
安装情况（大、小转角）	挂线	14	正挂左地线
		15	左地线已挂，正挂右地线
		16	正挂右地线
		17	右地线已挂，正挂左地线
		18	地线已挂，正挂上导线
		19	地线、上导线已挂，正挂左导线
		20	地线、上导线、左导线已挂，正挂右导线
		21	地线、上导线已挂，正挂右导线
		22	地线、上导线、右导线已挂，正挂左导线
	紧线	23	正紧左地线（大荷载侧）
		24	左地线已紧，正紧右地线（大荷载侧）
		25	正紧右地线（大荷载侧）
		26	右地线已紧，正紧左地线（大荷载侧）
		27	地线已紧，正紧上导线（大荷载侧）
		28	地线、上导线已紧，正紧左导线（大荷载侧）
		29	地线、上导线、左导线已紧，正紧右导线（大荷载侧）
		30	地线、上导线已紧，正紧右导线（大荷载侧）
		31	地线、上导线、右导线已紧，正紧左导线（大荷载侧）
		32	正紧左地线（小荷载侧已紧，正紧大荷载侧）
		33	左地线已紧，正紧右地线（小荷载侧已紧，正紧大荷载侧）
		34	正紧右地线（小荷载侧已紧，正紧大荷载侧）
		35	右地线已紧，正紧左地线（小荷载侧已紧，正紧大荷载侧）
		36	地线已紧，正紧上导线（小荷载侧已紧，正紧大荷载侧）
		37	地线、上导线已紧，正紧左导线（小荷载侧已紧，正紧大荷载侧）
		38	地线、上导线、左导线已紧，正紧右导线（小荷载侧已紧，正紧大荷载侧）

续表

荷载组合		组合描述	
安装情况（大、小转角）	紧线	39	地线、上导线已紧，正紧右导线（小荷载侧已紧，正紧大荷载侧）
		40	地线、上导线、右导线已紧，正紧左导线（小荷载侧已紧，正紧大荷载侧）
	起吊跳线串	41	导、地线安装完毕，前侧大张力，后侧小张力，起吊跳线串
断线情况（大、小转角）		42	断左地线，中导线有纵向不平衡张力
		43	断左地线，左导线有纵向不平衡张力
		44	断右地线，中导线有纵向不平衡张力
		45	断右地线，右导线有纵向不平衡张力
		46	右中导线有纵向不平衡张力
		47	左中导线有纵向不平衡张力
		48	左右导线有纵向不平衡张力
不均匀覆冰情况（大、小转角）		49	90°风，最大弯矩

注 1. 本表所列工况组合为一般转角塔（未含终端塔、分支塔等特殊塔型）荷载的基本组合；
2. 平地线路一般可不考虑上拔工况；
3. 安装工况仅考虑90°风情况；
4. 挂线工况仅考虑正在安装大荷载侧情况；
5. 中、重冰区杆塔须计算不均匀覆冰最大扭的工况；
6. 验算覆冰工况按规范执行；
7. 安装导线时必须同时使用横担前后两组施工挂孔，以保证铁塔受力均匀；
8. 考虑到工程各设计标段可能发生的特殊情况，杆塔荷载组合包括但不仅限于以上工况。

（3）双回路鼓型直线塔荷载的基本组合见表8-34。

表8-34　双回路鼓型直线塔荷载的基本组合

荷载组合		组合描述	
运行情况	大风	1	90°大风
		2	60°大风
		3	45°大风
		4	0°大风
		5	90°大风最小垂直档距
		6	60°大风最小垂直档距
		7	45°大风最小垂直档距
		8	0°大风最小垂直档距
	覆冰	9	90°风
安装情况	吊装	10	吊装左地线
		11	左地线已吊，吊装右地线
		12	地线已吊，吊装左上导线
		13	地线已吊、左上导线已吊，吊装右上导线
		14	地线、上导线已吊，吊装左中导线
		15	地线、上导线、左中导线已吊，吊装右中导线
		16	地线、上导线、中导线已吊，吊装左下导线
		17	地线、上导线、中导线、左下导线已吊，吊装右下导线

续表

荷载组合		组合描述	
安装情况	锚线	18	左地线正锚
		19	左地线已锚，正锚右地线
		20	地线已锚，正锚左上导线
		21	地线、左上导线已锚，正锚右上导线
		22	地线、上导线已锚，正锚左中导线
		23	地线、上导线、左中导线已锚，正锚右中导线
		24	地线、上导线、中导线已锚，正锚左下导线
		25	地线、上导线、中导线、左下导线已锚，正锚右下导线
断线情况		26	断左地线，左上导线有纵向不平衡张力
		27	断左地线，左中导线有纵向不平衡张力
		28	断左地线，左下导线有纵向不平衡张力
		29	左、右上导线有纵向不平衡张力
		30	左、右中导线有纵向不平衡张力
		31	左、右下导线有纵向不平衡张力
		32	左上、左中导线有纵向不平衡张力
		33	左上、左下导线有纵向不平衡张力
		34	左中、左下导线有纵向不平衡张力
不均匀覆冰情况		35	90°风，最大弯矩

注 1. 本表所列工况组合为杆塔荷载的基本组合，未考虑分期架设条件；
2. 安装情况仅考虑90°风情况；
3. 中、重冰区杆塔须计算不均匀覆冰最大扭的工况；
4. 验算覆冰工况按规范执行；
5. 直线塔计算时需考虑导线单、双挂点情况；
6. 安装导线时必须同时使用横担前后两组施工挂孔，以保证铁塔受力均匀；
7. 考虑到工程各设计标段可能发生的特殊情况，杆塔荷载组合包括但不仅限于以上工况。

（4）双回路鼓型转角塔荷载的基本组合见表8-35。

表8-35　　双回路鼓型转角塔荷载的基本组合

荷载组合		组合描述	
运行情况（大、小转角）	大风	1	90°风，两侧大张力
		2	90°风，前侧大张力，后侧小张力
		3	90°风，前侧大张力，后侧上拔
		4	45°风，两侧大张力
		5	45°风，前侧大张力，后侧小张力
		6	45°风，前侧大张力，后侧上拔
		7	90°反向风，两侧大张力
		8	90°反向风，前侧大张力，后侧小张力
	覆冰	9	90°风，两侧大张力
		10	90°风，前侧大张力，后侧小张力
		11	90°风，前侧大张力，后侧上拔

续表

荷载组合		组合描述	
运行情况（大、小转角）	低温	12	最低气温工况，两侧大张力
		13	最低气温工况，前侧大张力，后侧小张力
安装情况（大、小转角）	挂线	14	正挂左地线
		15	左地线已挂，正挂右地线
		16	正挂右地线
		17	右地线已挂，正挂左地线
		18	地线已挂，正挂左上导线
		19	地线、左上导线已挂，正挂右上导线
		20	地线已挂，正挂右上导线
		21	地线、右上导线已挂，正挂左上导线
		22	地线、上导线已挂，正挂左中导线
		23	地线、上导线、左中导线已挂，正挂右中导线
		24	地线、上导线已挂，正挂右中导线
		25	地线、上导线、右中导线已挂，正挂左中导线
		26	地线、上导线、中导线已挂，正挂左下导线
		27	地线、上导线、中导线、左下导线已挂，正挂右下导线
		28	地线、上导线、中导线已挂，正挂右下导线
		29	地线、上导线、中导线、右下导线已挂，正挂左下导线
	紧线	30	正紧左地线（大荷载侧）
		31	左地线已紧，正紧右地线（大荷载侧）
		32	正紧右地线（大荷载侧）
		33	右地线已紧，正紧左地线（大荷载侧）
		34	地线已紧，正紧左上导线（大荷载侧）
		35	地线、左上导线已紧，正紧右上导线（大荷载侧）
		36	地线已紧，正紧右上导线（大荷载侧）
		37	地线、右上导线已紧，正紧左上导线（大荷载侧）
		38	地线、上导线已紧，正紧左中导线（大荷载侧）
		39	地线、上导线、左中导线已紧，正紧右中导线（大荷载侧）
		40	地线、上导线已紧，正紧右中导线（大荷载侧）
		41	地线、上导线、右中导线已紧，正紧左中导线（大荷载侧）
		42	地线、上导线、中导线已紧，正紧左下导线（大荷载侧）
		43	地线、上导线、中导线、左下导线已紧，正紧右下导线（大荷载侧）
		44	地线、上导线、中导线已紧，正紧右下导线（大荷载侧）
		45	地线、上导线、中导线、右下导线已紧，正紧左下导线（大荷载侧）
		46	正紧左地线（小荷载侧已紧，正紧大荷载侧）
		47	左地线已紧，正紧右地线（小荷载侧已紧，正紧大荷载侧）
		48	正紧右地线（小荷载侧已紧，正紧大荷载侧）

续表

荷载组合		组合描述	
安装情况（大、小转角）	紧线	49	右地线已紧，正紧左地线（小荷载侧已紧，正紧大荷载侧）
		50	地线已紧，正紧左上导线（小荷载侧已紧，正紧大荷载侧）
		51	地线、左上导线已紧，正紧右上导线（小荷载侧已紧，正紧大荷载侧）
		52	地线已紧，正紧右上导线（小荷载侧已紧，正紧大荷载侧）
		53	地线、右上导线已紧，正紧左上导线（小荷载侧已紧，正紧大荷载侧）
		54	地线、上导线已紧，正紧左中导线（小荷载侧已紧，正紧大荷载侧）
		55	地线、上导线、左中导线已紧，正紧右中导线（小荷载侧已紧，正紧大荷载侧）
		56	地线、上导线已紧，正紧右中导线（小荷载侧已紧，正紧大荷载侧）
		57	地线、上导线、右中导线已紧，正紧左中导线（小荷载侧已紧，正紧大荷载侧）
		58	地线、上导线、中导线已紧，正紧左下导线（小荷载侧已紧，正紧大荷载侧）
		59	地线、上导线、中导线、左下导线已紧，正紧右下导线（小荷载侧已紧，正紧大荷载侧）
		60	地线、上导线、中导线已紧，正紧右下导线（小荷载侧已紧，正紧大荷载侧）
		61	地线、上导线、中导线、右下导线已紧，正紧左下导线（小荷载侧已紧，正紧大荷载侧）
	起吊跳线串	62	导、地线安装完毕，前侧大张力，后侧小张力，起吊跳线串
断线情况（大、小转角）		63	断左地线，左上导线有纵向不平衡张力
		64	断左地线，左中导线有纵向不平衡张力
		65	断左地线，左下导线有纵向不平衡张力
		66	断右地线，右上导线有纵向不平衡张力
		67	断右地线，右中导线有纵向不平衡张力
		68	断右地线，右下导线有纵向不平衡张力
		69	左上、左中导线有纵向不平衡张力
		70	左上、左下导线有纵向不平衡张力
		71	左中、左下导线有纵向不平衡张力
		72	右上、右中导线有纵向不平衡张力
		73	右上、右下导线有纵向不平衡张力
		74	右中、右下导线有纵向不平衡张力
		75	左、右上导线有纵向不平衡张力
		76	左、右中导线有纵向不平衡张力
		77	左、右下导线有纵向不平衡张力
不均匀覆冰情况（大、小转角）		78	90°风，最大弯矩

注　1. 本表所列工况组合为一般转角塔（未含终端塔、分支塔等特殊塔型）荷载的基本组合，未考虑分期架设条件；
2. 平地线路一般可不考虑上拔工况；
3. 安装工况仅考虑90°风情况；
4. 挂线工况仅考虑正在安装大荷载侧情况；
5. 中、重冰区杆塔须计算不均匀覆冰最大扭的工况；
6. 验算覆冰工况按规范执行；
7. 安装导线时必须同时使用横担前后两组施工挂孔，以保证铁塔受力均匀；
8. 考虑到工程各设计标段可能发生的特殊情况，杆塔荷载组合包括但不仅限于以上工况。

2. 500kV 直流线路铁塔

（1）单回路干字型直线塔荷载的基本组合见表 8-36。

表 8-36 单回路干字型直线塔荷载的基本组合

荷载组合		组合描述	
运行情况	大风	1	90°大风
		2	60°大风
		3	45°大风
		4	0°大风
		5	90°大风最小垂直档距
		6	60°大风最小垂直档距
		7	45°大风最小垂直档距
		8	0°大风最小垂直档距
	覆冰	9	90°风
安装情况	吊装情况	10	吊装左地线
		11	左地线已吊，吊装右地线
		12	地线已吊，吊装左导线
		13	地线、左导线已吊，吊装右导线
	锚线情况	14	锚装左地线
		15	左地线已锚，正锚右地线
		16	地线已锚，正锚左导线
		17	地线、左导线已锚，正锚右导线
事故情况		18	断左地线
		19	左导线有纵向不平衡张力
不均匀覆冰情况		20	90°风，最大弯矩

注 1. 本表所列工况组合为杆塔荷载的基本组合；
2. 安装情况仅考虑 90°风情况；
3. 中、重冰区杆塔需计算不均匀覆冰最大扭的工况；
4. 验算覆冰工况按规范执行；
5. 直线塔计算时需考虑导线单、双挂点情况；
6. 安装导线时必须同时使用横担前后两组施工挂孔，以保证铁塔受力均匀；
7. 考虑到工程各设计标段可能发生的特殊情况，杆塔荷载组合包括但不仅限于以上工况。

（2）单回路干字型耐张塔荷载的基本组合见表 8-37。

表 8-37 单回路干字型耐张塔荷载的基本组合

荷载组合		组合描述	
运行情况（大、小转角）	大风	1	90°风，两侧大张力
		2	90°风，前侧大张力，后侧小张力
		3	90°风，前侧大张力，后侧上拔
		4	45°风，两侧大张力
		5	45°风，前侧大张力，后侧小张力
		6	45°风，前侧大张力，后侧上拔
		7	90°反向风，两侧大张力
		8	90°反向风，前侧大张力，后侧小张力

续表

荷载组合		组合描述	
运行情况（大、小转角）	覆冰	9	90°风，两侧大张力
		10	90°风，前侧大张力，后侧小张力
		11	90°风，前侧大张力，后侧上拔
	低温	12	最低气温工况，两侧大张力
		13	最低气温工况，前侧大张力，后侧小张力
安装情况（大、小转角）	挂线	14	正挂左地线
		15	左地线已挂，正挂右地线
		16	正挂右地线
		17	右地线已挂，正挂左地线
		18	地线已挂，正挂左导线
		19	地线、左导线已挂，正挂右导线
		20	地线已挂，正挂右导线
		21	地线、右导线已挂，正挂左导线
	紧线	22	正紧左地线（大荷载侧）
		23	左地线已紧，正紧右地线（大荷载侧）
		24	正紧右地线（大荷载侧）
		25	右地线已紧，正紧左地线（大荷载侧）
		26	地线已紧，正紧左导线（大荷载侧）
		27	地线、左导线已紧，正紧右导线（大荷载侧）
		28	地线已紧，正紧右导线（大荷载侧）
		29	地线、右导线已紧，正紧左导线（大荷载侧）
		30	正紧左地线（小荷载侧已紧，正紧大荷载侧）
		31	左地线已紧，正紧右地线（小荷载侧已紧，正紧大荷载侧）
		32	正紧右地线（小荷载侧已紧，正紧大荷载侧）
		33	右地线已紧，正紧左地线（小荷载侧已紧，正紧大荷载侧）
		34	地线已紧，正紧左导线（小荷载侧已紧，正紧大荷载侧）
		35	地线、左导线已紧，正紧右导线（小荷载侧已紧，正紧大荷载侧）
		36	地线已紧，正紧右导线（小荷载侧已紧，正紧大荷载侧）
		37	地线、右导线已紧，正紧左导线（小荷载侧已紧，正紧大荷载侧）
	起吊跳线串	38	导、地线安装完毕，前侧大张力，后侧小张力，起吊跳线串
事故情况（大、小转角）		39	断左地线、左导线有纵向不平衡张力
		40	断右地线，右导线有纵向不平衡张力
不均匀覆冰情况（大、小转角）		41	90°风，最大弯矩

注 1. 本表所列工况组合为一般转角塔（未含终端塔、F塔等特殊塔型）荷载的基本组合；
2. 平地线路一般可不考虑上拔工况；
3. 安装工况仅考虑90°风情况；
4. 挂线工况仅考虑正在安装大荷载侧情况；
5. 中、重冰区杆塔须计算不均匀覆冰最大扭的工况；
6. 验算覆冰工况按规范执行；
7. 安装导线时必须同时使用横担前后两组施工挂孔，以保证铁塔受力均匀；
8. 考虑到工程各设计标段可能发生的特殊情况，杆塔荷载组合包括但不仅限于以上工况。

第四节 自立式铁塔内力分析及变形计算

自立式铁塔大多是由若干片平面桁架组成的空间结构。过去一般都将其分解成若干片平面桁架进行内力分析，这种方法略去了桁架的空间作用，因此是一种近似法。但它对大多数简单的静定结构或超静定次数较少的结构（例如上字型塔、干字型塔、双回路鼓型塔等）所引起的误差不大，因此它仍是一种既简单而又实用的分析方法。对于复杂结构（如酒杯型塔、猫头型塔），由于其实际内力分配十分复杂，欲将其分解成平面桁架计算时，必须引进一些假设，这在一定程度上影响了结构分析的精度。随着计算机的广泛应用，空间桁架有限元法计算程序的发展，使铁塔内力分析更为精确。

一、组成塔架的杆系形式

塔架一般由若干片平面桁架组成。平面桁架的杆系布置常有单腹杆系、双腹杆系、再分式腹杆系、K型腹杆系、倒K型腹杆系等，如图8-35所示。

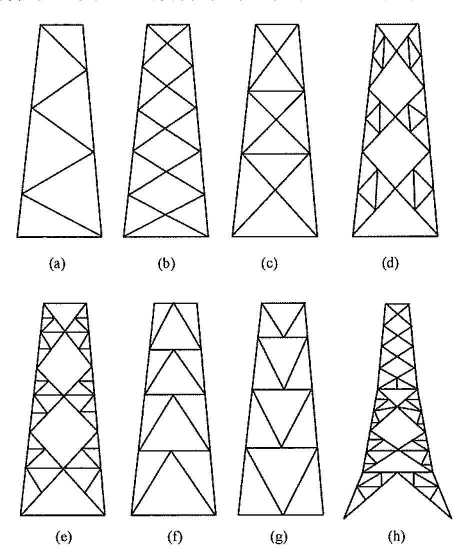


图8-35 平面桁架的杆系形式

（a）单腹杆系；（b）双腹杆系；（c）柔性腹杆系；（d）、（e）有辅助杆件的双腹杆系；（f）K型腹杆系；（g）倒K型腹杆系；（h）混合腹杆系

单腹杆系：常用在荷载小、结构尺寸小的结构中。例如110kV以下的铁塔常用单腹杆系。对主要承受轴向压力的拉线塔主柱也多采用单腹杆系。

双腹杆系：常用于输电线路的自立式铁塔。腹杆可以设计成刚性的或柔性的（交叉腹杆为拉条），如图8-35（c）。为了减小主材、腹杆的支承长度，可在节间中布置一些辅助杆件，这些杆件在计算中并不受力，但为了可靠地支承主材和腹杆，也必须要有一定的强度和刚度。

K型和倒K型腹杆系：当铁塔宽度较大时常采用K型或倒K型腹杆系。例如大跨越塔的塔身常采用这种腹杆形式。在一般铁塔的腿部常采用K型腹杆系。

混合腹杆系：在一基铁塔中，为适应不同部位受力不同的需要，往往综合应用各种不同的腹杆形式，以达到最经济的效果。

二、横隔的形式和设置

为了把各片平面桁架组合起来成为一个几何不变形的塔架，或者为了传力的需要，常需设置横隔。

在塔身坡度变化断面处、直接受扭力的断面处和塔顶及腿部与塔身连接断面处应设置横隔面。同一塔身坡度不变段内，横隔面设置间距一般不大于平均宽度（宽面）的5倍，也不宜大于4个主材分段。受力横隔面必须是一个几何不变形的体系，可由刚性或柔性杆件组成。横隔面太大时，应采取措施，防止隔面因自重引起下垂。

横隔常有图8-36的各种形式。图（a）常用于塔架横截面尺寸较小的部位，图（b）～（e）是输电线路铁塔中最常见的形式。图（c）中的横杆可以用刚性杆件，也可以用柔性拉杆。图（f）则用于横截面尺寸特别大的跨越高塔上。

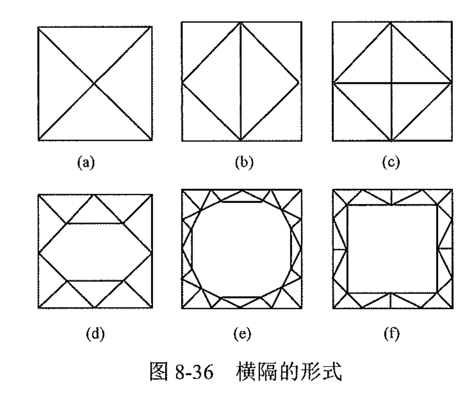


图8-36 横隔的形式

三、铁塔电算方法简介

铁塔计算过程主要包括建立铁塔计算模型、计算塔身风荷载、计算导地线荷载、杆件内力分析以及杆件截面选择（或验算）等内容。目前铁塔计算已普遍采用计算机程序计算。

（一）铁塔内力分析软件计算原理

输电线路自立式铁塔内力分析软件的计算原理一般采用空间桁架有限元法，该方法在土木工程中应用十分广泛，如大跨径屋盖网架、通信塔、桥梁等。空间桁架的有限元法以整个塔架为超静定空间体系，假定杆件的交汇处为铰结节点，不传递弯矩，因此所有

的杆件受力分析时均只考虑轴向力作用。

为便于空间桁架整体分析，需要选用一个统一的三维直角坐标系作为整体坐标系。通常铁塔计算采用的三维直角坐标系 X、Y 轴平行于水平面，Z 轴垂直于水平面，并满足右手系原则，如图 8-37 所示。X 轴一般取与横担平行；Z 轴同重力方向一致，并应同塔体的中心轴线重合，以便能利用铁塔的对称性。

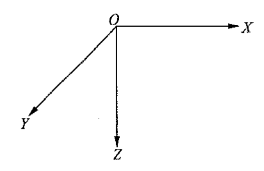


图 8-37 坐标系

取塔架中的任意一根杆件，假设其一端节点为 R，另一端节点为 S。杆件 RS 的长度为

$$l_{\mathrm{RS}}=\sqrt{(x_{\mathrm{R}}-x_{\mathrm{S}})^2+(y_{\mathrm{R}}-y_{\mathrm{S}})^2+(z_{\mathrm{R}}-z_{\mathrm{S}})^2} \tag{8-28}$$

式中 x_{R}、y_{R}、z_{R} ——节点 R 的坐标；

x_{S}、y_{S}、z_{S} ——节点 S 的坐标。

假设向量 $\boldsymbol{RS}$ 与整体坐标系的 X、Y、Z 轴的正方向之间的夹角依次为 φ_X、φ_Y、φ_Z，向量 $\boldsymbol{RS}$ 与整体坐标系的方向余弦可由节点 R 、S 的坐标表达为

$$\alpha=\cos\varphi_X=\frac{x_{\mathrm{S}}-x_{\mathrm{R}}}{l_{\mathrm{RS}}}；\qquad \beta=\cos\varphi_Y=\frac{y_{\mathrm{S}}-y_{\mathrm{R}}}{l_{\mathrm{RS}}}；$$

$$\gamma=\cos\varphi_Z=\frac{z_{\mathrm{S}}-z_{\mathrm{R}}}{l_{\mathrm{RS}}}$$

设节点 R 的位移向量为 $\{\varDelta_{\mathrm{R}}\}=\varDelta_{\mathrm{RX}}i+\varDelta_{\mathrm{RY}}j+\varDelta_{\mathrm{RZ}}k$，该位移向量在 $\boldsymbol{RS}$ 上的投影为

$$\alpha\varDelta_{\mathrm{RX}}+\beta\varDelta_{\mathrm{RY}}+\gamma\varDelta_{\mathrm{RZ}}=[\alpha\quad\beta\quad\gamma]\begin{bmatrix}\varDelta_{\mathrm{RX}}\\ \varDelta_{\mathrm{RY}}\\ \varDelta_{\mathrm{RZ}}\end{bmatrix} \tag{8-29}$$

设节点 S 的位移向量为 $\{\varDelta_{\mathrm{S}}\}=\varDelta_{\mathrm{SX}}i+\varDelta_{\mathrm{SY}}j+\varDelta_{\mathrm{SZ}}k$，该位移向量在 $\boldsymbol{RS}$ 上的投影为

$$\alpha\varDelta_{\mathrm{SX}}+\beta\varDelta_{\mathrm{SY}}+\gamma\varDelta_{\mathrm{SZ}}=[\alpha\quad\beta\quad\gamma]\begin{bmatrix}\varDelta_{\mathrm{SX}}\\ \varDelta_{\mathrm{SY}}\\ \varDelta_{\mathrm{SZ}}\end{bmatrix} \tag{8-30}$$

杆端力与位移关系可用 Hooke 定律表示。由于杆件只受轴力作用，杆件 RS 的 R 端外力 $\{F_{\mathrm{R}}\}_{\mathrm{S}}$ 与位移关系距阵为

$$\left.\begin{aligned}\{F_{\mathrm{R}}\}_{\mathrm{S}}&=\begin{bmatrix}\alpha\\ \beta\\ \gamma\end{bmatrix}\frac{EA}{l_{\mathrm{RS}}}[\alpha\quad\beta\quad\gamma](\{\varDelta_{\mathrm{R}}\}-\{\varDelta_{\mathrm{S}}\})\\ \{F_{\mathrm{R}}\}_{\mathrm{S}}&=[K_{\mathrm{RS}}](\{\varDelta_{\mathrm{R}}\}-\{\varDelta_{\mathrm{S}}\})\end{aligned}\right\} \tag{8-31}$$

式中 E ——杆件的弹性模量；

A ——杆件的截面面积；

$[K_{\mathrm{RS}}]$ ——杆件 RS 的单元刚度矩阵。

$$[K_{\mathrm{RS}}]=\begin{bmatrix}\alpha\\ \beta\\ \gamma\end{bmatrix}\frac{EA}{l_{\mathrm{RS}}}[\alpha\quad\beta\quad\gamma]=\frac{EA}{l_{\mathrm{RS}}}\begin{bmatrix}\alpha^2&\alpha\beta&\alpha\gamma\\ \alpha\beta&\beta^2&\beta\gamma\\ \alpha\gamma&\beta\gamma&\gamma^2\end{bmatrix} \tag{8-32}$$

塔架每根杆件都存在类似于式（8-32）的方程，当数根杆件 RJ、RK、…、RS 都交汇于节点 R 时，则式（8-31）扩大成方程组

$$\left.\begin{aligned}\{F_{\mathrm{R}}\}_{\mathrm{J}}&=[K_{\mathrm{RJ}}](\{\varDelta_{\mathrm{R}}\}-\{\varDelta_{\mathrm{J}}\})\\ \{F_{\mathrm{R}}\}_{\mathrm{K}}&=[K_{\mathrm{RK}}](\{\varDelta_{\mathrm{R}}\}-\{\varDelta_{\mathrm{K}}\})\\ &\cdots\\ \{F_{\mathrm{R}}\}_{\mathrm{S}}&=[K_{\mathrm{RS}}](\{\varDelta_{\mathrm{R}}\}-\{\varDelta_{\mathrm{S}}\})\end{aligned}\right\} \tag{8-33}$$

或简写成

$$\begin{aligned}\sum\{F_{\mathrm{R}}\}=\sum[K_{\mathrm{RR}}]\{\varDelta_{\mathrm{R}}\}-[K_{\mathrm{RJ}}]\{\varDelta_{\mathrm{J}}\}-\\ [K_{\mathrm{RK}}]\{\varDelta_{\mathrm{K}}\}-\cdots-[K_{\mathrm{RS}}]\{\varDelta_{\mathrm{S}}\}\end{aligned} \tag{8-34}$$

式中

$$\left.\begin{aligned}\sum\{F_{\mathrm{R}}\}&=\{F_{\mathrm{R}}\}_{\mathrm{J}}+\{F_{\mathrm{R}}\}_{\mathrm{K}}+\cdots+\{F_{\mathrm{R}}\}_{\mathrm{S}}\\ \sum[K_{\mathrm{RR}}]&=[K_{\mathrm{RJ}}]+[K_{\mathrm{RK}}]+\cdots+[K_{\mathrm{RS}}]\end{aligned}\right\} \tag{8-35}$$

假设整个塔架有 n 个节点 $(i=1,2,\cdots,n)$，塔架节点受力平衡的整体方程组为

$$\begin{Bmatrix}\sum\{F_1\}\\ \sum\{F_2\}\\ \sum\{F_3\}\\ \cdots\\ \sum\{F_n\}\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}\sum[K_{11}]&-[K_{12}]&-[K_{13}]&\cdots&-[K_{1n}]\\ -[K_{21}]&\sum[K_{22}]&-[K_{23}]&\cdots&-[K_{2n}]\\ -[K_{31}]&-[K_{32}]&\sum[K_{33}]&\cdots&-[K_{3n}]\\ \cdots&\cdots&\cdots&\cdots&\cdots\\ -[K_{n1}]&-[K_{n2}]&-[K_{n3}]&\cdots&\sum[K_{nn}]\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\{\varDelta_1\}\\ \{\varDelta_2\}\\ \{\varDelta_3\}\\ \cdots\\ \{\varDelta_n\}\end{Bmatrix} \tag{8-36}$$

求解式（8-36），可得到每个节点的位移，结合节点位移和每根杆件的单元刚度矩阵，便可求出每根杆件的内力。

（二）铁塔计算模型

1. 节点编号

每个节点都要指定一个数字号，称为节点号。可指定节点号的个位数是 0～3，它代表了节点之间的坐标对称规律。以 230 节点为例，231 是 230 的左右对称点、

232 是 230 的前后对称点、233 是 232 的左右对称点。

2. 铁塔杆件输入

输入杆件两端头的节点号，确定一条空间线段，给线段赋予必要的信息，线段便可代表铁塔杆件参与铁塔受力分析及选材。需要输入的杆件信息包括：选材信息、对称信息、类型信息、连接信息及计算长度信息等。

关于杆件的规格，如果是验算的铁塔，杆件的材质和规格是已知的，直接输入即可。对于新设计的铁塔，应先给每根杆件指定材质和初始规格（一般取材料库中的最小规格），在此基础上程序进行铁塔风压和自重荷载计算以及铁塔刚度矩阵的建立，计算出各杆件的内力后，进行杆件选材；以选出的杆件规格为基础，再次进行铁塔风压和自重荷载计算以及铁塔刚度矩阵的建立，计算出各杆件的内力后，再次进行杆件选材。这个过程一直进行到第 N 次选材结果与第 $N-1$ 次选材结果完全相同时结束，一般称为选材收敛。

（三）荷载处理

铁塔内力分析软件的原理采用空间桁架有限元法，假定杆件的交汇处为铰结节点，杆件不传递弯矩，因此所有的荷载必须加载到节点上，且每个节点所受荷载都应分解到 X 轴、Y 轴及 Z 轴三个方向。

一些特殊的杆件，在实际受力情况中不可避免地需要承受弯矩荷载，在铁塔计算时需要对其加载方式做特殊处理。如直线塔的挂线角钢，荷载实际作用在挂线角钢中部，但是铁塔计算时通常将荷载按照比例关系分别加载到挂线角钢杆件的两端头，之后再对挂线角钢杆件做受弯验算。

部分节点既是塔身风荷载作用点，又是导地线挂点，其作用的荷载应为风压及自重荷载与导地线荷载的累加值。

关于塔身风荷载和导地线荷载的计算详见本章第三节。

（四）杆件截面选择

根据铁塔内力分析的结果，选取各杆件的最大内力（拉力和压力）及最不利的同时受压情况，逐根选择杆件截面及连接螺栓。对承受弯矩的杆件还应根据具体构造验算其强度和稳定性。关于杆件截面选择计算详见本章第八节。

（五）钢管塔次应力分析

钢管塔主材之间通过法兰连接，其刚度较大，如果只按照整体空间桁架法分析钢管塔而不考虑节点刚度，部分杆件的受力分析结果往往与试验结果存在较大差异，故在对钢管塔进行有限元分析时应考虑节点刚度的影响。但由于其斜材与主材的连接更接近铰接，因此通常采用梁杆混合单元计算模型对钢管塔进行整塔有限元分析。通常塔身主材及横担上下平面主材采用梁单元，斜材及辅助材采用杆单元。钢管塔主材在采用梁杆混合单元模型计算时不仅会产生轴力还会产生弯矩，要按照拉弯或压弯构件对主材进行强度和稳定的计算。

根据一系列钢管塔的真型试验和理论分析的结果，当钢管构件长细比较小（杆件计算长度 L 与钢管直径 D 之比 $L/D<12$）时，应考虑次应力对钢管局部稳定的影响，此外塔腿和变坡处为次应力集中比较严重的地方，应严格控制其选材应力比。

四、静定平面桁架的内力分析

虽然应用有限元法计算程序能更精确地计算铁塔内力，但是在分析铁塔的传力过程、杆件的控制工况及结构的合理性等方面，传统的平面桁架内力分析思路则更为清晰明了。

铁塔设计中惯用的平面桁架分析法，常略去与荷载方向相垂直的那两片平面桁架的作用，假定只由与荷载方向相平行的两片桁架承受荷载。因此，当荷载不与桁架平面相平行时，首先要将荷载分解成与桁架平面平行或垂直的分量，分别计算各片桁架在这些分量作用下的内力，而后进行叠加。

如图 8-38 所示的塔架，在横向力 P 和纵向力 T 共同作用下，其杆件内力要分别计算。即先计算前后两片桁架在 P 作用下的内力和左右两片桁架在 T 作用下的内力，而后进行叠加得出其总的内力。在分解、组合荷载时，当 P 作用在前后两片桁架的对称平面内或 T 作用在左右两片桁架的对称平面内时，假定此荷载 P 或 T 平均作用在前后或左右两片平面桁架上。假若荷载 P（或 T）并不作用在这两片平面桁架的对称平面内时，则还需计入扭力 T_k（见图 8-39）。此时各片平面桁架所受的荷载在正面桁架为 $P/2-T_k$；背面桁架为 $P/2+T_k$；左侧面桁架为 $T/2-T_k$；右侧面桁架为 $T/2+T_k$。其中 $T_k=\dfrac{Te}{2b}$。

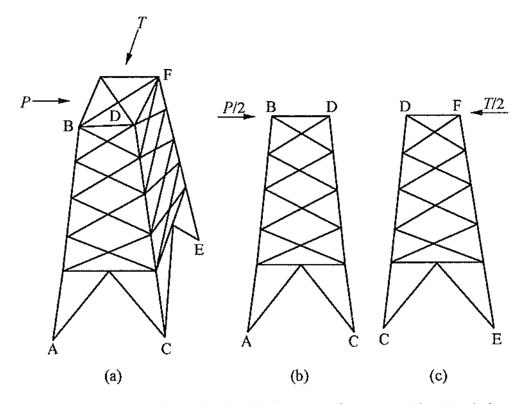


图 8-38　在横向和纵向荷载共同作用下塔架的受力
（a）塔架受力简图；（b）正面桁架受力；
（c）右侧面桁架受力

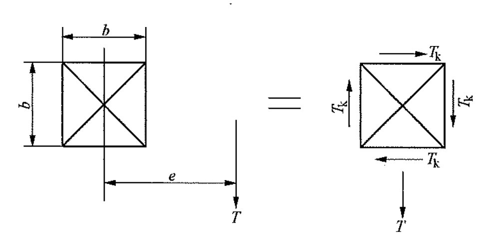


图 8-39 荷载作用在对称平面外时的扭力

平面桁架的内力分析可用节点法、截面法等，其基本原理都是经典力学中三个静力平衡方程式的具体运用，即

$$\left.\begin{array}{l}\sum X=0\\ \sum Y=0\\ \sum M=0\end{array}\right\} \quad (8\text{-}37)$$

（一）用节点法分析平面桁架的杆件内力

节点法是取桁架节点为隔离体，利用不共线的两个方向上的受力平衡条件计算各杆件的未知力。

原则上讲，以节点法可以解算任何静定平面桁架。为避免解算联立方程，在截取节点时，作用于节点上的未知力应不多于两个。故在计算中首先要从未知力不超过两个的节点开始依次计算。一般情况可从主材或斜材的节点开始求解，有时也可从整体平衡条件中求出塔腿反力，从塔脚节点开始依次向上计算各杆件内力。

应用节点法时，利用某些节点的特殊情况常可使计算得到简化，这几种特殊情况是：

（1）两杆件相交节点上无荷载作用时［见图 8-40（a)］，两杆内力均等于零；

（2）三杆件节点上无荷载作用时，如其中有两杆件在一直线上［见图 8-40（b)］，则在同一直线上的两杆件的内力相等且性质（指受拉或受压）相同；

（3）四杆节点上无荷载作用时，如其中两杆在一直线上，而另两杆又在另一直线上［见图 8-40（c)］，则同一直线上的两杆的内力相等且性质相同。

由以上三种特殊情况，可以极其方便地判别平面桁架中某些不受力的零件，而使计算工作得到简化。

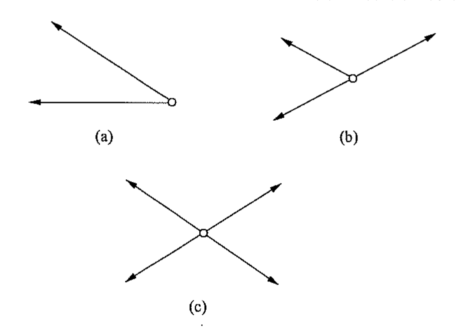


图 8-40 利用节点法求解杆件内力时的几种特殊情况
（a）两杆件相交、节点上无荷载；
（b）三杆件相交，两杆件在一直线上；
（c）四杆件相交成两直线

（二）用截面法分析平面桁架杆件内力

截面法是从桁架中截出一部分作为隔离体，利用经典力学中的三个静力平衡方程（见式 8-37），计算所切各杆件中的未知轴力。如果所切各杆件中的未知轴力只有三个，它们既不相交于同一点，也不相互平行，便可用截面法直接求出这三个未知轴力。截面法常被用于塔身平面桁架杆件内力分析。

五、塔身内力分析

（一）塔身平面桁架杆件内力分析

（1）如图 8-41 所示单腹杆系平面桁架，用截面法分析杆件内力时，可逐次作截面 1-1、2-2、3-3…，取截面以上部分为割离体，运用静力平衡方程 $\sum X=0$、$\sum Y=0$ 和 $\sum M=0$ 计算各杆件内力。

1）主材内力计算。如图 8-41 所示，作截面 1-1、2-2、3-3、4-4，以 O_1、O_2、O_3、O_4 为力矩点，建立力矩平衡方程计算主材内力

$$\sum M_{O_1}=0 \quad U_1=G_1\times a_1/b_1$$

$$\sum M_{O_2}=0 \quad U_2=\left[\frac{1}{2}(a_2-a_1)G_1+\frac{1}{2}(a_2+a_1)G_2+Ph_1\right]/b_2$$

$$\sum M_{O_3}=0 \quad U_3=\left[\frac{1}{2}(a_3+a_1)G_1+\frac{1}{2}(a_3-a_1)G_2+Ph_2\right]/b_3$$

$$\sum M_{O_4}=0 \quad U_4=\left[\frac{1}{2}(a_4-a_1)G_1+\frac{1}{2}(a_4+a_1)G_2+Ph_3\right]/b_4$$

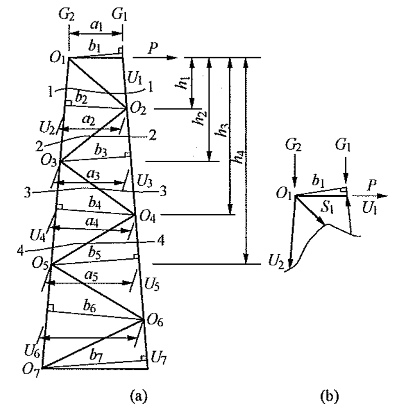
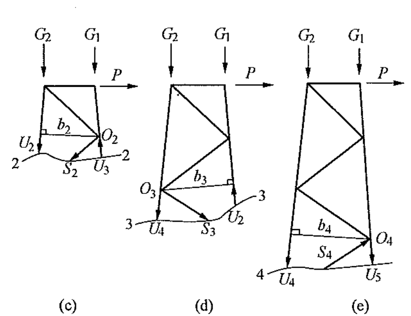



图 8-41 利用截面法计算平面桁架杆件内力
（a）平面桁架受力简图；（b）～（e）主材内力计算

2）斜材内力计算。如图 8-42 所示，以两弦杆延长线交点 O 为力矩点，建立力矩平衡方程，计算斜材内力

$$\sum M_O = 0 \quad S_1 = [Ph - (G_1 - G_2)a_1/2]/C_1$$

$$S_2 = [Ph - (G_1 - G_2)a_1/2]/C_2$$

$$S_3 = [Ph - (G_1 - G_2)a_1/2]/C_3$$

……

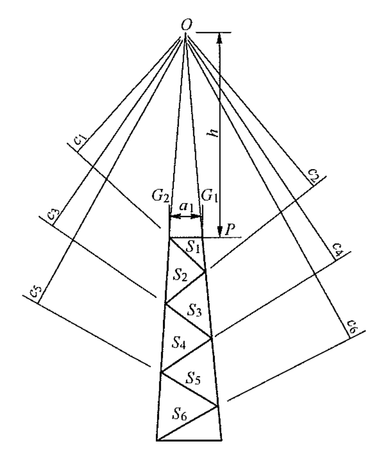


图 8-42 利用截面法计算平面桁架斜材内力

为使计算方便，在建立平衡方程时，最好使每一平衡方程式中只包含一个未知力，因此在建立力矩平衡方程式时要适当选取力矩点。

在节点法、截面法计算中，一般可假定该杆件的未知力为拉力，如果计算结果为负值，则代表该杆件是受压力。在实际计算中可以综合应用节点法或截面法，使计算尽可能地简化。

（2）如图 8-43（a）所示为双腹杆系平面桁架，可逐次作截面 1-1、2-2、3-3…，以截面以上部分为割离体，以双腹杆交点为力矩点，建立力矩平衡方程式，计算各主材内力。以两根主材延长线的交点为力矩点，并假定两根腹杆的受力大小相等，方向相反（一拉一压），建立力矩平衡方程式，计算各斜材内力。

1）主材内力计算：

$$\sum M_{O_1} = 0 \quad U_1 = \pm\left[P_1h_1 + \frac{1}{2}a_1(G_1 - G_2)\right]/2b_1$$

$$\sum M_{O_2} = 0$$

$$U_2 = \pm\left[P_1h_2 + P_2(h_2 - C_1) + \frac{1}{2}a_1(G_1 - G_2)\right]/2b_2$$

$$\sum M_{O_3} = 0$$

$$U_3 = \pm\left[P_1h_3 + P_2(h_3 - C_1) + P_3(h_3 - C_1 - C_2) + \frac{1}{2}a_1(G_1 - G_2)\right]/2b_3$$

……

2）斜材内力计算：

$$\sum M_O = 0 \quad S_2 = \pm[P_1l_1 - (G_1 - G_2)\times a_1/2]/2d_2$$

$$\sum M_O = 0 \quad S_3 = \pm[P_1l_1 \pm P_2l_2 - (G_1 - G_2)\times a_1/2]/2d_3$$

$$\sum M_O = 0$$

$$S_4 = \pm[P_1l_1 \pm P_2l_2 \pm P_3l_3 - (G_1 - G_2)\times a_1/2]/2d_4$$

……

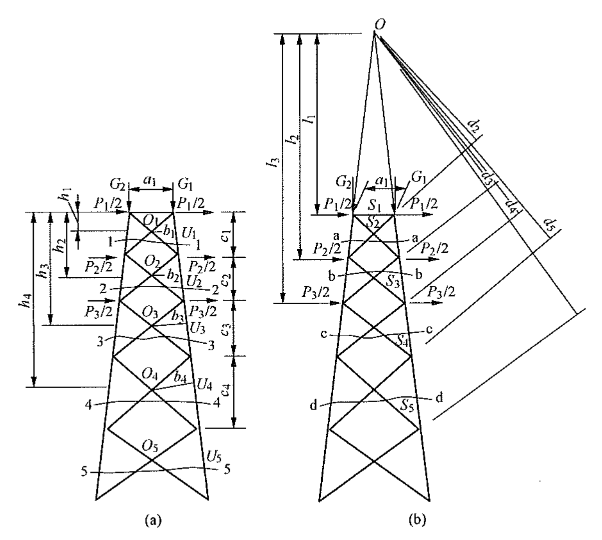


图 8-43 双腹杆系平面桁架主、斜材内力计算

（a）主材内力计算；（b）斜材内力计算

（3）如图 8-44（a）所示为 K 型腹杆系平面桁架，可逐次作截面 1-1、2-2、3-3…，以截面以上部分为割离体，以斜材和水平材的交点为力矩点，建立力矩平衡方程式，计算各主材内力。仍以截面 1-1、2-2、3-3…以上为割离体，以两根主材延长线的交点为力矩点，并假定两根斜材的内力大小相等，方向相反，建立力矩平衡方程式计算斜材内力。同样作截面 a-a、b-b、c-c…，也以两根主材延长线的交点为力矩点，并假定水平材的左右两侧的内力大小相等、方向相反，建立力矩平衡方程式，计算水平材内力。

1）主材内力计算：

$$\sum M_{O_1} = 0 \quad U_1 = \pm(G_1 - G_2)a_1/2/2b_1$$

$$\sum M_{O_2} = 0 \quad U_2 = \pm[P_1h_2 + (G_1 - G_2)a_1/2]/2b_2$$

$$\sum M_{O_3} = 0$$

$$U_3 = \pm[P_1h_3 + P_2(h_3 - h_2) + (G_1 - G_2)a_1/2]/2b_3$$

……

2）斜材内力计算：

$$\sum M_O = 0 \quad S_2 = \pm[P_1l_1 - (G_1 - G_2)a_1/2]/2d_2$$

$$\sum M_O = 0 \quad S_4 = \pm[P_1l_1 + P_2l_2 - (G_1 - G_2)a_1/2]/2d_4$$

$$\sum M_O = 0$$

$S_6=\pm[P_1l_1+P_2l_2+P_3l_3-(G_1-G_2)a_1/2]/2d_6$

……

3）水平材内力计算：

$\sum M_O=0 \quad S_1=\pm P_1l_1/2l_1$

$\sum M_O=0 \quad S_3=\pm(P_1l_1+P_2l_2)/2l_2$

$\sum M_O=0 \quad S_5=\pm(P_1l_1+P_2l_2+P_3l_3)/2l_3$

……

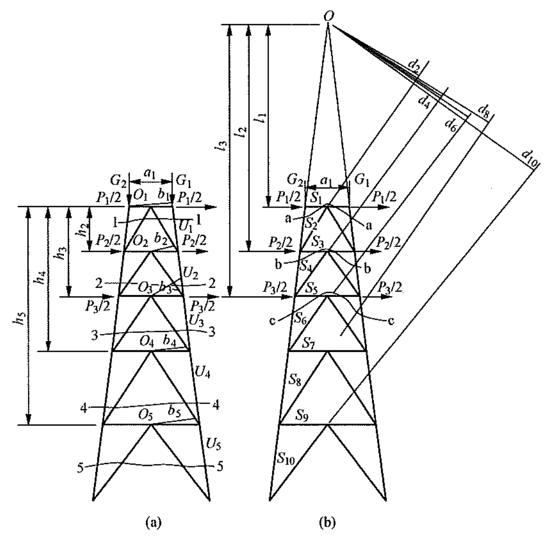


图 8-44 K 型腹杆系主、斜材内力计算

（a）主材内力计算；（b）斜材内力计算

（4）如图 8-45（a）所示为倒 K 型腹杆系平面桁架，可逐次作截面 1-1、2-2、3-3…，以截面以上部分为割离体，以斜材和水平材的交点为力矩点，建立力矩平衡方程式，计算各主材内力。仍以截面 1-1、2-2、3-3…以上为割离体，以两根主材延长线的交点为力矩点，并假定两斜材的内力相等、方向相反，建立力矩平衡方程式，计算斜材内力。同样作截面 a-a、b-b、c-c…，也以两根主材延长线的交点为力矩点，并假定水平材两侧的内力大小相等、方向相反，计算水平材内力。

1）主材内力计算：

$\sum M_{O_1}=0 \quad U_1=\pm[P_1h_1+(G_1-G_2)a_1/2]/2b_1$

$\sum M_{O_2}=0$

$U_2=\pm[P_1h_2+P_2(h_2-h_1)+(G_1-G_2)a_1/2]/2b_2$

$\sum M_{O_3}=0$

$U_3=\pm[P_1h_3+P_2(h_3-h_1)+P_3(h_4-h_2)+(G_1-G_2)a_1/2]/2b_3$

……

2）斜材内力计算：

$\sum M_O=0 \quad S_1=\pm[P_1l_1+(G_2-G_1)a_1/2]/2d_1$

$\sum M_O=0 \quad S_3=\pm[P_1l_1+P_2l_2+(G_2-G_1)a_1/2]/2d_2$

$\sum M_O=0$

$S_5=\pm[P_1l_1+P_2l_2+P_3l_3+(G_2-G_1)a_1/2]/2d_3$

……

3）水平材内力计算：

$\sum M_O=0 \quad S_2=\pm P_1l_1/2l_2$

$\sum M_O=0 \quad S_4=\pm(P_1l_1+P_2l_2)/2l_3$

……

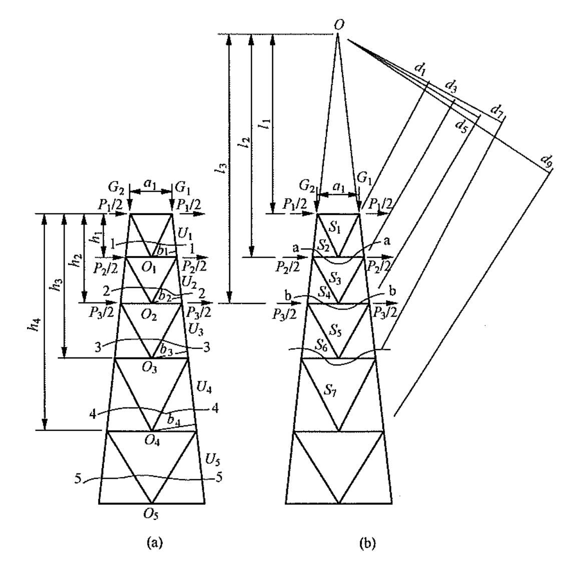


图 8-45 倒 K 型腹杆系主、斜材内力计算

（a）主材内力计算；（b）斜材内力计算

（5）当平面桁架的两根主材相互平行，并利用截面法计算斜材内力时，可利用 $\sum X=0$ 或 $\sum Y=0$ 两个静力平衡方程求解。

如图 8-46 所示的横担平面，欲计算其斜材内力，可作截面 1-1、2-2…，利用静力平衡条件 $\sum Y=0$ 计算斜材 S_1、S_2 的内力。

$\sum Y=0 \quad S_1=\pm(T_1-R_1)/2\sin\alpha_1$

$\sum Y=0 \quad S_2=\pm R_2/2\sin\alpha_2$

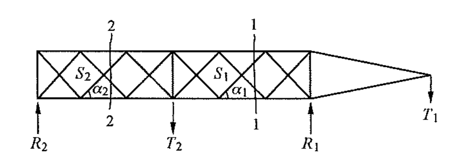


图 8-46 具有平行弦杆的平面桁架的斜材内力计算

（6）图 8-47（a）所示在每个节点上都有水平材的双腹杆系平面桁架，是一个超静定结构，在实用上有两种假定：

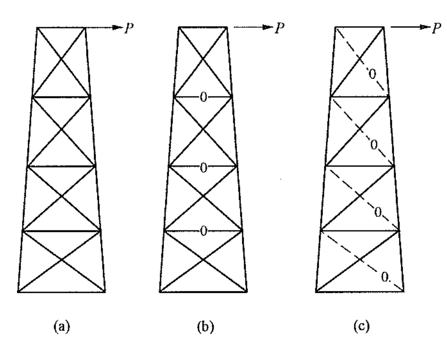


图 8-47　有水平横杆的双腹杆系受力

（a）有水平横杆的双腹杆系；（b）斜材按拉压体系计算；（c）斜杆按拉杆计算

1）假定水平杆不能受力，仅为构造而设，如图 8-47（b）所示，这时桁架的内力分析与双腹杆系平面桁架完全相同，而水平材可按辅助材的要求设置。

2）假定斜材只能承受拉力不能承受压力，这时两根交叉斜材中只有一根承受拉力，另一根为零杆，水平材承受压力，如图 8-47（c）所示。按此设计一般可获得较为经济的效果，但塔的刚度较差，故最好能对斜材施加一定的初张力（严格讲斜材施加初张力后结构成一非线性体系，宜用非线性原理分析内力）。

（二）塔架外荷载分配

如前所述，在工程设计中常将塔架分解成平面桁架后进行分析，这样就存在着如何将外荷载分配到各平面桁架的问题。

1. 塔架在横向或纵向对称荷载作用下的计算

当塔架是对称的（包括主材、斜材的截面也是对称的）、荷载也是对称的［见图 8-48（a）］，则此横向或纵向荷载可平均分配在与荷载方向平行的两个平面桁架上，与荷载方向相垂直的两个平面桁架不承受此荷载。

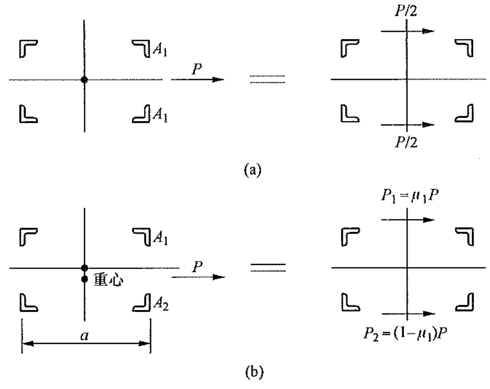


图 8-48　荷载在两片桁架上的分配

（a）结构对称，荷载作用在对称平面内；（b）结构不对称，荷载作用在重心平面内

当截面不对称，外荷载作用在截面重心上时，此荷载在两个与荷载方向相同的平面桁架上按刚度成正比分配。如图 8-48（b）所示，在荷载 P 作用下，前后两个桁架的变形应相等。假设两个平面桁架的抗弯刚度分别为

$$EI_1 = 2EA_1\left(\frac{a}{2}\right)^2;\quad EI_2 = 2EA_2\left(\frac{a}{2}\right)^2$$

对悬臂结构，当端部有荷载 P_1 和 P_2（$P_1+P_2=P$）作用时的位移为

$$\varDelta_1 = \frac{P_1 l_1^3}{3EI_1} = \frac{P_1 l_1^3}{3\times 2EA_1\left(\frac{a}{2}\right)^2}$$

$$\varDelta_2 = \frac{P_2 l_2^3}{3EI_2} = \frac{P_2 l_2^3}{3\times 2EA_2\left(\frac{a}{2}\right)^2}$$

式中　A_1、A_2 ——前后两片桁架弦杆的截面积，mm²；

l_1、l_2 ——前后两片桁架的悬臂长度，mm。

因 $\varDelta_1 = \varDelta_2$ 故 $\dfrac{P_1 l_1^3}{3\times 2EA_1\left(\frac{a}{2}\right)^2} = \dfrac{P_2 l_2^3}{3\times 2EA_2\left(\frac{a}{2}\right)^2}$

设 $P_1 = \mu_1 P, P_2 = (1-\mu_1)P = \mu_2 P$；又因 $\varDelta_1 = \varDelta_2$

故得

$$\frac{\mu_1 P l_1^3}{A_1} = \frac{(1-\mu_1)P l_2^3}{A_2} \tag{8-38}$$

$$\mu_1 = \frac{A_1}{A_1 + A_2\left(\frac{l_1}{l_2}\right)^3};\quad \mu_2 = 1-\mu_1 \tag{8-39}$$

μ_1、μ_2 即为荷载在两个平面桁架上的分配系数。

2. 塔架受扭计算

当外荷载既不作用在塔架对称平面内，又没有作用在塔架截面的重心上时，塔架将受到弯、扭的联合作用。此时要将外荷载分配在各个平面桁架上时，可将外荷载以作用在截面重心上的纵向（或横向）荷载和扭矩 M_k 来代替（见图 8-49），对作用在截面重心上的纵向或横向荷载，可按前面叙述方法用其刚度比分配。对扭矩则可分解成两对剪力（T_A 和 T_B）分别作用在四个平面桁架上。

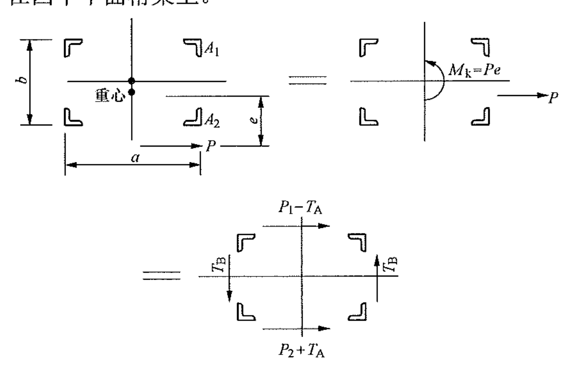


图 8-49　塔架受扭计算

（1）当塔身各段正侧面宽度的比（a/b）不变、且当 $a/b \leqslant 2$、受扭节间数不少于 4 时，各面所分配的扭力可按式（8-40）计算，即

$$\left.\begin{aligned} T_A &= \frac{Pe}{2b} \\ T_B &= \frac{Pe}{2a} \end{aligned}\right\} \tag{8-40}$$

式中 T_A ——正面扭力，N；

T_B ——侧面扭力，N。

式（8-40）中符号见图 8-49。

（2）当塔身上部的正侧面宽度比 a_1/b_1 不等于下部的正侧面宽度比 a_2/b_2 时（见图 8-50），应按超静定原理分析，先计算横隔材的受力，再算出正侧面的受力分配。如塔身多于一个横隔面时，则必须逐段计算，步骤如下：

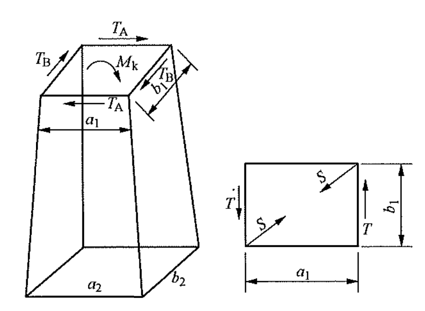


图 8-50 塔身上下 a/b 不同时的扭力计算

1）将扭矩 M_k 折算成扭力 $T = M_k / a_1$，作用在侧面两片桁架上；

2）将横隔材切开并以未知力 S 代替，由力法方程式（8-41）求解 S；

$$S\delta_{11} + \Delta_{1P} = 0 \tag{8-41}$$

3）正侧面的扭力分别为

$$T_A = \frac{Sa_1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}} \qquad T_B = \frac{Sb_1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}} \tag{8-42}$$

一般情况下塔身之间的横隔间距较大（大多在 7m 以上），相对来讲横隔面抵抗变形的能力较大，故在扭力 M_k 作用下横隔面本身的变形 δ_P 可以忽略不计，也即

$$\delta_P = \sum \frac{\overline{N_1} N_{TA}}{EA} l + \sum \frac{\overline{N_1} N_{TB}}{EA} l \approx 0 \tag{8-43}$$

式中 $\overline{N_1}$ ——在 $S=1$ 作用下各塔身主材和斜材的虚内力，N；

N_{TA} ——在 T_A 作用下各塔身主材和斜材的内力，N；

N_{TB} ——在 T_B 作用下各塔身主材和斜材的内力，N。

在计算变形中，斜材的影响很小，一般可以忽略不计，因此要满足式（8-43）就必须有 $N_{TA} = -N_{TB}$，即由 T_A 产生的主材内力在数值上要与由 T_B 产生的内力相等，但受力性质相反，由于 $N_{TA} \approx \frac{T_A H}{a_2}$、$N_{TB} \approx \frac{T_B H}{b_2}$，所以 $\frac{T_A}{a_2} = \frac{T_B}{b_2}$，即在横隔面上正侧面上的剪力比可近似地取塔身下部正侧面宽度之比。又因 $M_k = T_B a_1 + T_A b_1$，并由 $T_A = \frac{a_2}{b_2} T_B$，故可解得

$$\left.\begin{aligned} T_A &= \frac{M_k}{b_1 + b_2 \dfrac{a_1}{a_2}} \\ T_B &= \frac{M_k}{a_1 + a_2 \dfrac{b_1}{b_2}} \end{aligned}\right\} \tag{8-44}$$

六、常用横担、横隔及塔头内力分析

在工程设计中常需将空间结构的塔架分解成平面桁架后，进行内力分析，因此，要做出一些假设。下面所介绍的横担、地线支架、横隔等计算中均做了一些假设，所以是近似计算。但这些假设均经过多个工程的实践和试验验证，基本上可满足工程建设和运行的要求。

（一）角锥形横担

角锥形横担（见图 8-51）是输电杆塔导线荷载较小时使用的一种横担，由上下主材交汇于挂线点构成。为减小主材的计算长度，各面还可设置一些辅助杆件。一般假定横向荷载由下平面的两根主材承受；垂直荷载由前后两片桁架承受；纵向张力可有两种假设，即纵向张力由上下平面按刚度分担或完全由下平面承担（当上平面结构布置能够传递纵向张力时，可假定纵向张力由上下平面按刚度分担；反之，考虑纵向张力完全由下平面承担）。角锥形横担导线挂点存在偏心影响，具体设计时需考虑此影响。

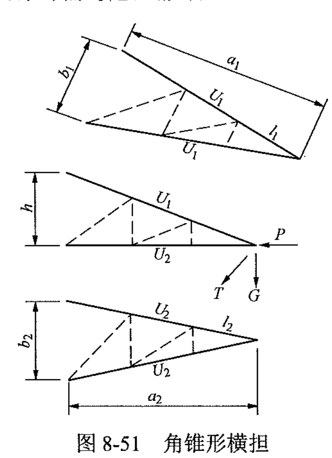


图 8-51 角锥形横担

在图 8-51 所示荷载作用下横担各杆件内力为

上平面主材受力：$U_1 = Gl_1 / 2h$

下平面主材受力：

$$U_2 = (-Ga_2 / 2h - P / 2 \pm Ta_2 / b_2) l_2 / a_2$$

当考虑上平面分担一部分纵向张力时，U_1、U_2 分别为

$$U_1 = (Ga_1 / 2h \pm \mu_1 Ta_1 / b_1) l_1 / a_1$$

$$U_2 = (-Ga_2 / 2h - P / 2 \pm \mu_2 Ta_2 / b_2) l_2 / a_2$$

$$\mu_1 = \frac{A_1}{A_1 + A_2\left(\dfrac{a_1}{a_2}\right)^3} \qquad \mu_2 = 1 - \mu_1$$

式中 μ_1、μ_2——纵向张力在上、下平面的分配系数；

A_1、A_2——上下弦主材横截面积，mm²；

l_1、l_2——上下弦主材的实长，mm；

其他符号含义如图 8-51 所示。

（二）鸭嘴形横担

当导线荷载较大时，应考虑使用鸭嘴形横担，如图 8-52 所示。一般规定横向荷载由横担下平面主材承受；垂直荷载由前后两片桁架分担；纵向张力可只由下平面承受（此时上平面斜材布置一般至少空出一个节间），亦可由上下平面共同分担（此时上下平面结构布置均能传递纵向张力）。对于耐张、转角杆塔，由于两侧挡距不同，作用在两个挂线点 A、B 上的荷载可能不同，故计算中应取其较大者。现设 $G = G_1 + G_2$、$P = P_1 + P_2$ 且 $G_1 > G_2$、$T_1 > T_2$，则

上平面主材受力：$U_1 = G_1 l_1 / h$

下平面主材受力：$U_2 = (-G_1 a_2 / h - P_1 \pm Ta_3 / 2b_3) l_2 / a_2$

下平面斜材受力：$S_i = Ta_0 / 2c_i$

当考虑上平面分担纵向张力时，应按 $T_1 = \mu_1 T$、$T_2 = \mu_2 T$ 将纵向张力分配在上下两个平面后，计算各杆件内力。

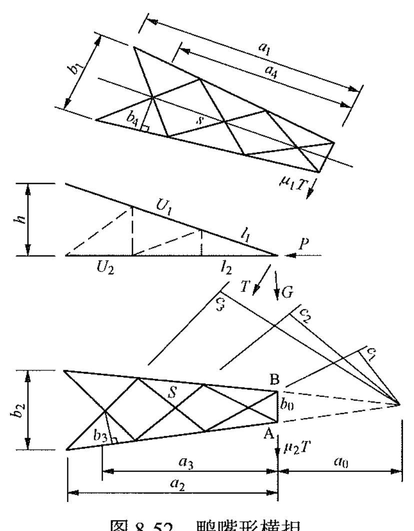


图 8-52 鸭嘴形横担

（三）矩形横担

一般设垂直荷载由前后两片平面桁架承受，横向荷载由下平面主材承受，纵向荷载也可有两种假设，一是假定纵向张力 T 完全由下平面承担，二是假定纵向张力由上、下平面分担。

1. 上平面不承受纵向张力时（见图 8-53）

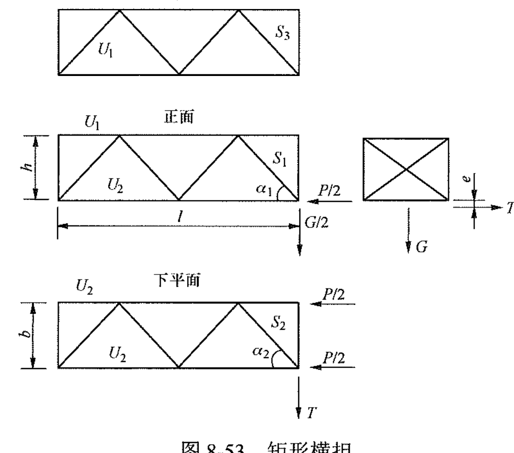


图 8-53 矩形横担

$$U_1 = Gl / 2h$$

$$U_2 = -3Gl / 8h - P / 2 \pm Tl / b$$

$$S_1 = G / 2\sin\alpha_1$$

$$S_2 = T / \sin\alpha_2$$

$$S_3 = 0$$

2. 考虑上平面分担纵向张力时（见图 8-54）

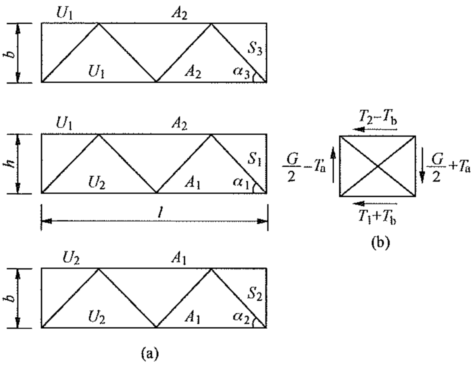


图 8-54 矩形横担（上平面分担张力时）

设下平面主角钢截面 A_1，上平面主角钢截面 A_2，纵向张力作用点距下平面的距离 e（见图 8-53）。

由于上、下主角钢截面不同，横担为非对称截面，横担截面的重心距由式（8-45）确定。

$$x = \frac{A_1(h - Z_1) + A_2 Z_2}{A_1 + A_2} \tag{8-45}$$

式中 x——横担截面的重心距，mm；

Z_1、Z_2分别为上、下主角钢的重心距离，mm。

纵向张力可分解为作用在截面重心上的剪力T和扭矩M_k，也即

$$M_k = T(e+x)$$

则作用在各面的扭力为

$$T_a = \frac{M_k}{2b} \quad T_b = \frac{M_k}{2h} \tag{8-46}$$

作用在上下平面的剪力为

$$\left.\begin{aligned} T_1 &= \frac{A_1}{A_1 + A_2\left(\frac{l_1}{l_2}\right)^3}T = \frac{A_1}{A_1+A_2}T = \mu_1 T \\ T_2 &= \mu_2 T = (1-\mu_1)T \end{aligned}\right\} \tag{8-47}$$

作用在各断面的荷载如图8-54（b）所示。杆件受力为

$$U_1 = -(T_2 - T_b)l/b - (T_a - G/2)l/h$$

或 $$U_1 = (T_2 - T_b)l/b + (T_a + G/2)l/h$$

$$U_2 = -(T_1 + T_b)l/b + (T_a - G/2)l/h$$

或 $$U_2 = (T_1 + T_b)l/b - (T_a + G/2)l/h$$

$$S_1 = \pm\left(\frac{G}{2} + T_a\right)/\sin\alpha_1$$

$$S_2 = \pm(T_1 + T_b)/\sin\alpha_2$$

$$S_3 = \pm(T_2 - T_b)/\sin\alpha_3$$

（四）地线支架

图8-55是以往工程中常见的直线杆塔地线支架，如果将四根主材汇交于一点，计算虽简单，但其受力计算结果与实际受力情况存在较大差异。如果假定如前述“矩形横担”型式，虽仍有偏心，但基本接近实际受力情况，此情况计算时一般可假定垂直荷载G、横向荷载P由前后两个平面分担，用截面法计算内力。纵向荷载可有两种假设，一是假设纵向张力完全由内侧面承担；二是假设纵向张力由内、外两个侧面承担，此时纵向张力可以用一个作用在支架顶端的剪力T和扭矩$M_k = Te$代替。剪力T可按地线支架两个侧面的刚度分配。分析扭矩作用下的支架受力时，可用分别作用于支架侧面顶部的一对扭力T_T和作用于前后两个面之间的未知横向剪力X代替，将地线支架拆成四片平面桁架，利用前后两片桁架之间相对位移为零的条件，建立力法方程求解。这样作用在外侧面的纵向力为

$$T_1 = \mu_1 T + T_T = \frac{A_1}{A_1 + A_2\left(\frac{l_1}{l_2}\right)^3}T + Te/a \tag{8-48}$$

式中　b ——地线支架顶部侧面宽度；

l_1、l_2、A_1、A_2 ——分别为外侧面和内侧面主角钢的长度和横截面积。

作用在内侧面的纵向力为

$$T_2 = \mu_2 T - T_T = (1-\mu_1)T - Te/a \tag{8-49}$$

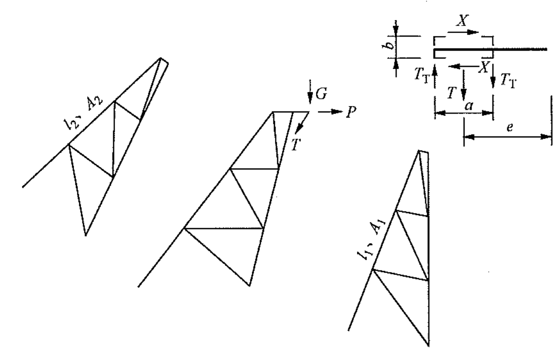


图8-55　旧式地线支架

作用在前后面的未知力X可用解一次超静定的方法求解，也可近似地由下式求解，即

$$X = \pm Te/b \tag{8-50}$$

各杆件的内力即为上述T_1、T_2和X共同作用下的内力之和，如图8-56所示。

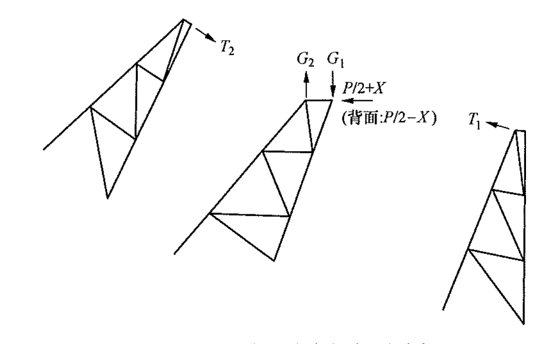


图8-56　旧式地线支架各面受力

图8-57是目前工程中常见的鸟嘴形地线支架，其内力分析方法可参见本节之前所述的鸭嘴型横担的内力分析方法。

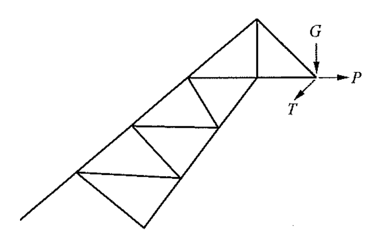


图8-57　鸟嘴形地线支架

（五）横隔

具有交叉斜材的横隔（见图8-58）是超静定结构，但工程设计中一般可假定两斜杆受力相等，方向相反，且各承受一半扭力，故斜杆受力为

$$S = \frac{1}{2}\sqrt{T_A^2 + T_B^2} \tag{8-51}$$

如塔身为正方形截面，则 $T_A=T_B$，$S=\frac{1}{2}\sqrt{2T_A^2}=0.707T_A$。

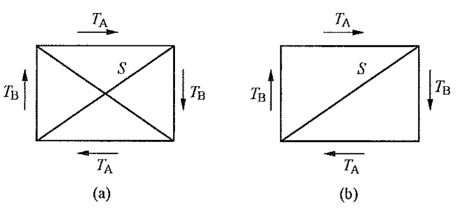


图 8-58　横隔计算

（a）交叉斜材横隔；（b）单根斜材横隔

（六）酒杯塔塔头

酒杯塔塔头由地线支架、横担、上曲臂和下曲臂组成（见图 8-59），其中上下曲臂连接点通称 K 节点。K 节点以上部分可以看作是一个两铰拱。

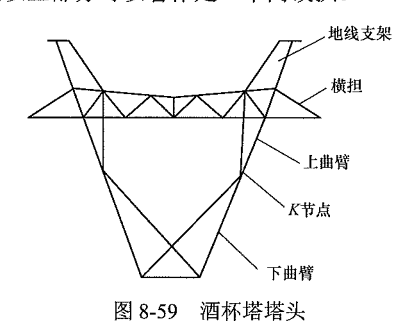


图 8-59　酒杯塔塔头

1. 在横向荷载下塔头内力分析

K 节点是铰接点，故把 K 节点切开后，在 K 节点上有两对反对称反力 H_x、R_y（见图 8-60），由下式计算，有

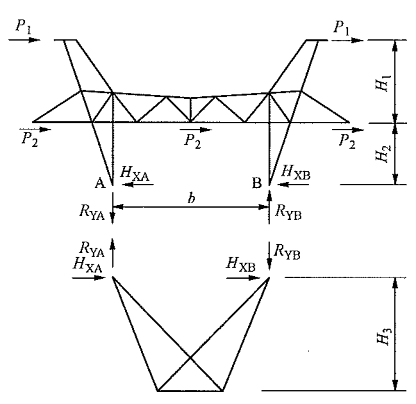


图 8-60　酒杯塔塔头在横向荷载下受力

$$\sum M_A=0 \qquad R_{YA}=R_{YB}=\pm M_A/b \tag{8-52}$$

$$\sum X=0 \qquad H_{XA}=H_{XB}=\sum P_X/2 \tag{8-53}$$

2. 在垂直荷载作用下塔头内力分析

当垂直力是对称时，K 节点有两对互成对称关系的反力 H_x、R_y，其中

$$R_y=\frac{1}{2}\sum G \tag{8-54}$$

H_x 是一对自成平衡关系的超静定反力。当垂直荷载不对称时，$R_{YA}\neq R_{YB}$，可由 $\Sigma M_A=0$ 和 $\Sigma M_B=0$ 的条件求得，即

$$R_{YA}=M_B/b\text{；}\quad R_{YB}=M_A/b \tag{8-55}$$

由于塔上只有垂直荷载，故不论此垂直荷载是否对称，H_{XA} 必与 H_{XB} 大小相等、方向相反（见图 8-61），可由上、下曲臂在 A、B 两点相对位移为零的条件求出，其步骤如下：

（1）在 K 节点施加一单位水平力 X=1，计算上下曲臂、横担等各杆件的虚内力 $\overline{N_1}$（见图 8-62）；

（2）计算上、下曲臂及横担各杆件在外荷载作用下的内力 N_P；

（3）建立力法方程，有

$$H_x\delta_{11}+\varDelta_{1P}=0 \tag{8-56}$$

或

$$H_x=-\varDelta_{1P}/\delta_{11}$$

$$\delta_{11}=\sum\frac{\overline{N_1}^2}{EA}l \qquad \varDelta_{1P}=\sum\frac{\overline{N_1}N_P}{EA}l$$

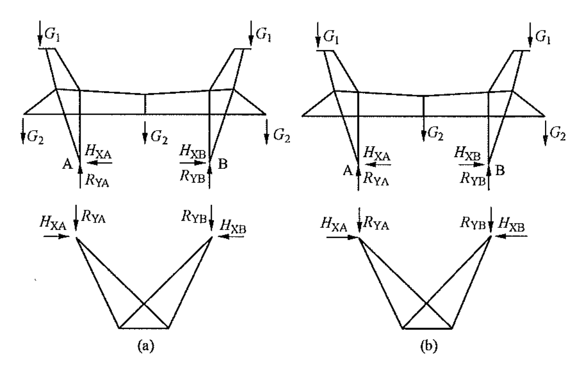


图 8-61　酒杯塔在垂直荷载下的受力

（a）在对称垂直荷载下；（b）在不对称垂直荷载下

在横向荷载和垂直荷载共同作用下时，K 节点的反力即为上述横向荷载及垂直荷载分别作用下反力之代数和，求得反力后即可用截面法、节点法计算各杆内力。

图 8-62　单位荷载 X=1 作用于 K 节点

3. 在纵向荷载作用下塔头内力分析

第一种情况：如图 8-63 所示，当上、下曲臂的内侧面，2–2、3–3 截面不能传递剪力时，纵向荷载只能由上、下曲臂的外侧面承受，此时只需算出上曲臂与横担连接点 C、D 的反力 R_C、R_D：

$$R_C = Ta/b\text{；}\ T_D = T(a+b)/b \qquad (8\text{-}57)$$

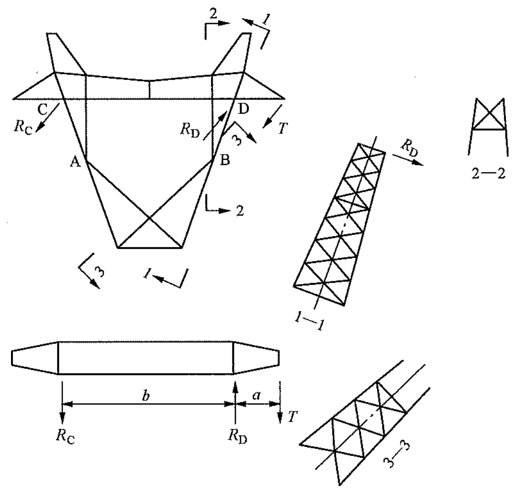


图 8-63 在纵向张力作用下塔头受力（一）

上曲臂外侧面分别承受 R_C 和 R_D。如果 K 节点外侧面上、下曲臂成一条直线，那么 R_C、R_D 也可假定只由下曲臂外侧面承受。否则在 R_C、R_D 作用下 K 节点还有横向和竖向反力分量。

第二种情况：当上曲臂的内侧面都能传递切力时，习惯上假设 R_C、R_D 作用在上曲臂内外侧面的中点，那么，上曲臂内外侧面各杆件受力各用 R_C、R_D 中较大者计算。在计算下曲臂时则假定上曲臂外侧面只承受 $R_C/2$（或 $R_D/2$，取大者），而另一半则由上曲臂内侧面承受并经 K 节点传至下曲臂的外侧面（见图 8-64）。此时 R_D、R_C 分别为

$$R_D = T(a_1+b_1)/b_1\text{；}\ R_C = Ta_1/b_1 \qquad (8\text{-}58)$$

上曲臂内侧面传至 K 节点的竖向和纵向分量为

$$S = R_D l_1/2c_2 \qquad (8\text{-}59)$$

$$\Delta S = S(c_2-c_1)/2l_1 \qquad (8\text{-}60)$$

则作用在 K 节点外侧面的纵向荷载为 $R_D/2-2\Delta S$。竖向分量 S 由正面桁架承受。

当 K 节点外侧面上、下曲臂不在一条直线上时，尚需考虑横向和竖向反力分量。

以上所述虽然是一种近似分析法，但经试验和多年实践证明能够保证结构的安全，而且计算比较简单，仍可在工程中采用。

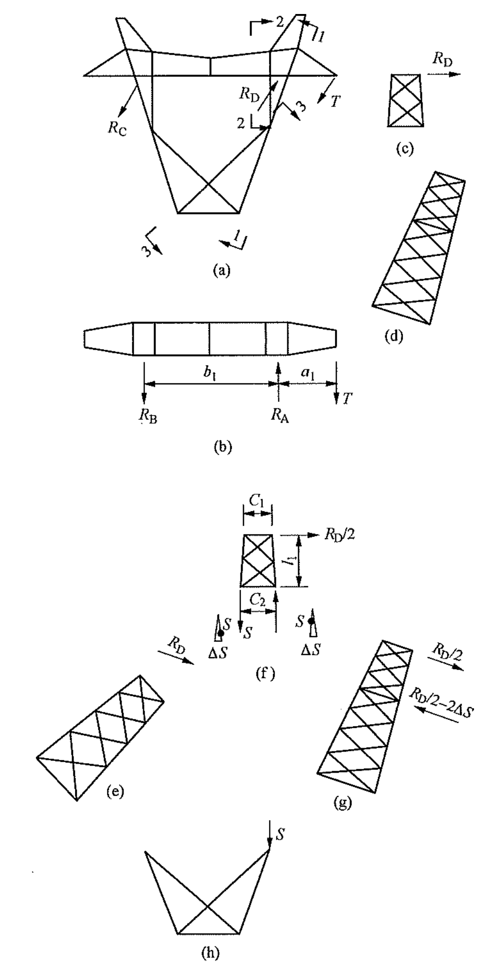


图 8-64 在纵向张力作用下塔头受力分析（二）

（a）正面；（b）横担平面；（c）计算上曲臂内侧面时假定；（d）计算上曲臂外侧面时假定；（e）下曲臂内侧面不受力；（f）计算下曲臂外侧面时上曲臂内侧面的假定；（g）计算下曲臂外侧面时的假定；（h）上曲臂内侧面的垂直分量作用于下曲臂

4. 横担部分构件内力计算

在横向和竖向荷载作用下，当求出 K 节点的反力后，即可用节点法或截面法逐根计算正面各杆件内力。在纵向张力作用下，可按上述假定计算上、下曲臂内外侧面各杆件的内力。对横担部分，可按假定此张力完全由下平面承受（如图 8-65 所示），计算各杆件内力。

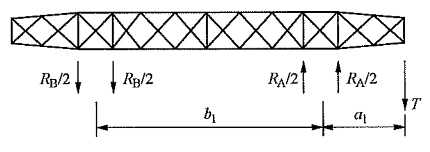


图 8-65 横担平面内构件内力计算

5. 内力综合

对每一种组合中的荷载可以分解成横向、纵向和

竖向荷载，并算得各杆内力后，即可用叠加的方法算得各杆件在各组合下杆件的实际受力。

（七）猫头塔塔头内力分析

猫头塔的塔头由上横担、上曲臂、下曲臂和下横担等组成（见图 8-66）。这种塔头假若去掉下横担，就和酒杯塔一样，因而它在垂直荷载、横向荷载及中导线纵向张力作用下的内力分析也与酒杯型塔相同。下导线有纵向张力作用时比较复杂，可按以下近似方法计算。

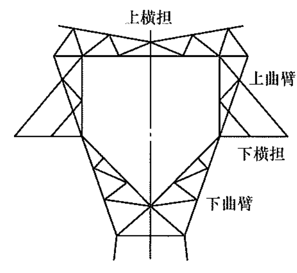


图 8-66　猫头塔塔头

当下导线挂线点有纵向张力作用时，在 K 节点上作用的荷载可分解成一纵向切力 T 和扭矩 M_k（见图 8-67），假定切力 T 由下曲臂内外侧面分担，扭矩 M_k 则由上下曲臂共同承担。

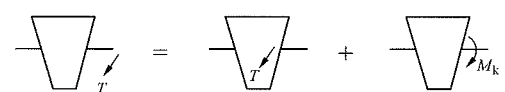


图 8-67　边导线纵向张力作用下力的分解

1. 切力 T 作用下，下曲臂内力计算

当假定内外侧面所承担的切力与内外侧面的纵向刚度成正比（见图 8-68），故内外侧面各承担的切力为

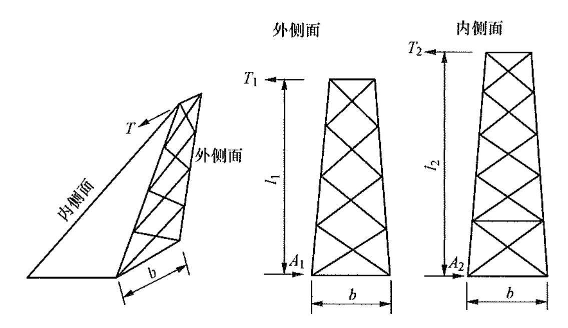


图 8-68　纵向张力作用下下曲臂计算

内侧面分担 $$T_1 = \mu_1 T = \frac{A_1}{A_1 + A_2\left(\dfrac{l_1}{l_2}\right)^3} T \qquad (8\text{-}61)$$

外侧面分担 $$T_2 = \mu_2 T = (1-\mu_1) T \qquad (8\text{-}62)$$

式中　μ_1、μ_2 ——内外侧面切力分配系数；

A_1、A_2 ——内外侧面主角钢截面积，mm²；

l_1、l_2 ——内外侧面桁架高度，mm。

2. 扭矩作用下上、下曲臂内力计算

扭矩 M_k 作用于 K 节点时共有三对未知量 X_2、M_1、M_2，其中 X_2 为上下曲臂间的相对切力；M_1 为上下曲臂间相对扭矩；M_2 为上下曲臂间相对纵向弯矩。经试验和计算证明：如略去 M_2，则对下曲臂的内力影响不大；对上曲臂略偏安全。这样，就可将塔头简化为二次超静定结构（见图 8-69）。

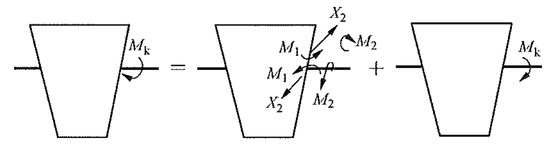


图 8-69　扭矩的分解

在 M_1 和 X_2 作用下，可从 K 节点处上下曲臂的截面相对转角为零和相对位移为零的条件，列出力法方程组

$$\left.\begin{aligned} \delta_{11}M_1 + \delta_{12}X_2 + \Delta_{1P} = 0(\text{相对转角为零}) \\ \delta_{21}M_1 + \delta_{22}X_2 + \Delta_{2P} = 0(\text{相对位移为零}) \end{aligned}\right\} \qquad (8\text{-}63)$$

式中　$\delta_{11} = 2(a_s + a_X)$ —— $M_1 = 1$ 作用时，沿 M_1 方向的转角；

$\delta_{12} = \delta_{21} = -b(a_s + a_X)$ —— $X_2 = 1$ 作用时，沿 M_1 方向的转角；

$\Delta_{1P} = -a_X M_k$ ——在 M_k 作用下沿 M_1 方向的转角；

$\Delta_{2P} \approx 0$ ——在 M_k 作用下沿 M_1 方向的转角；

a_s、a_X ——分别为 M_1 作用下，上、下曲臂沿 M_1 方向的转角；

$\delta_{22}=b^2(a_s + a_X)+\theta_1 h^2$ ——在 $X_2 = 1$ 作用下，沿 X_2 方向的位移；

b、h ——分别为两个 K 节点之间的水平距离和上曲臂的高度；

θ_1 ——横担在纵向单位力矩作用下的扭转角。

解式（8-63），可得上曲臂的扭矩为 M_1、附加切力 X_2，则下曲臂的扭矩为 $M_k - M_1$、附加切力为 X_2。

经计算统计，现在常用的 220～330kV 猫头型铁塔上曲臂分担的扭矩约为 0.3～0.4 M_k，下曲臂分担的扭矩约为 0.6～0.7M_k，附加切力 X_2 约为 0.0004～0.0005M_k。

七、辅助材内力分析

杆塔辅助材在其支撑点所提供的支撑力一般不低于所支撑主材内力的 2%、斜材内力的 5%，当受力材之间的夹角小于 25° 时，支撑该受力材的辅助材，其

承载力应适当提高或通过试验确定。

辅助材计算时应注意辅助材体系自身的内力平衡。如图 8-70 所示塔身平面桁架，在荷载 P 作用下，计算辅助材杆件 AB、BC 和 AC 的内力。

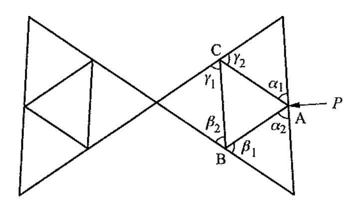


图 8-70 塔身平面桁架辅助材内力计算

设杆件 AB、BC 和 AC 的内力分别为 F_{AB}、F_{BC} 和 F_{AC}。

以 B 点为隔离体，可知 $F_{BC}=-F_{AB}\sin\beta_1/\sin\beta_2$

以 C 点为隔离体，可知 $F_{AC}=-F_{BC}\sin\gamma_1/\sin\gamma_2=F_{AB}\sin\beta_1\sin\gamma_1/(\sin\beta_2\sin\gamma_2)$

以 A 点为隔离体，可知 $F_{AC}\sin\alpha_1+F_{AB}\sin\alpha_2=P$

根据以上三个式子可解出：

$$F_{AB}=P\sin\beta_2\sin\gamma_2/(\sin\alpha_1\sin\beta_1\sin\gamma_1+\sin\alpha_2\sin\beta_2\sin\gamma_2)$$

$$F_{BC}=-P\sin\beta_1\sin\gamma_2/(\sin\alpha_1\sin\beta_1\sin\gamma_1+\sin\alpha_2\sin\beta_2\sin\gamma_2)$$

$$F_{AC}=P\sin\beta_1\sin\gamma_1/(\sin\alpha_1\sin\beta_1\sin\gamma_1+\sin\alpha_2\sin\beta_2\sin\gamma_2)$$

八、桁架的变形计算

桁架的变形可用虚功原理计算。即利用式（8-64）计算，得

$$\Delta_P=\sum\int\frac{\overline{N}_1N_P}{EA}ds=\sum\frac{\overline{N}_1N_P}{EA}l \quad (8\text{-}64)$$

式中 Δ_p——桁架某点在荷载 P 作用下的位移，mm；

$\overline{N}_1$——在该点沿所求变形方向施加一单位力 $N_1=1$ 后各杆件虚内力，N；

N_p——桁架在荷载标准值 P 作用下各杆件内力，N；

E、A、l——分别为各杆件的弹性模量，N/mm²；横截面积，mm²；长度，mm。

例如图 8-71 平面桁架，欲计算 A、B 两点的水平变位，可分别在 A、B 两点施加一水平虚单位力 $N_1=1$ 和 $N_2=1$，分别计算各杆件虚内力 $\overline{N}_1$ 和 $\overline{N}_2$，再计算各杆件在荷载 P_1、P_2 共同作用下的内力 N_p，而后计算 $\frac{\overline{N}_1N_p}{EA}l$ 和 $\frac{\overline{N}_2N_p}{EA}l$，累加后即可得 A、B 两点的水平变位 ΔA 和 ΔB。详见表 8-38。

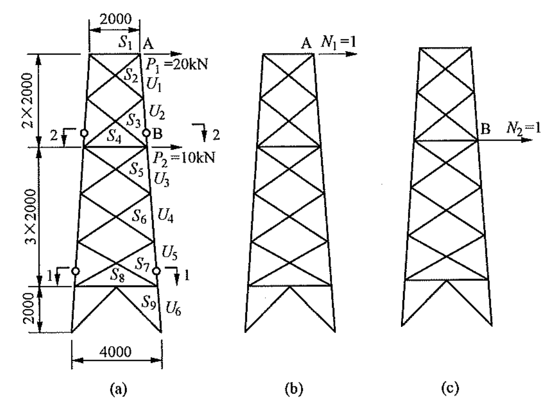


图 8-71 平面桁架变位计算

（a）桁架受力简图；（b）单位力 $N_1=1$ 作用于 A 点；（c）单位力 $N_2=1$ 作用于 B 点

表 8-38 位 移 计 算

杆件编号	杆件根数	杆件长度 l（cm）	杆件面积 A（cm²）	N_p（N）	A 点变形		B 点变形	
					$\overline{N}_1$	$\frac{\overline{N}_1N_p}{EA}l$	$\overline{N}_2$	$\frac{\overline{N}_2N_p}{EA}l$
U_1	2	200.7	8.797	±8570	±0.428	0.00796	0.0	0.0
U_2	2	200.7	8.797	±23570	±1.178	0.06031	0.0	0.0
U_3	2	200.7	12.301	±38330	±1.750	0.104	±0.333	0.0198
U_4	2	200.7	12.301	±53330	±2.200	0.182	±0.933	0.0773
U_5	2	200.7	12.301	±65450	±2.563	0.261	±1.418	0.1442
U_6	2	200.7	12.301	±70900	±2.727	0.300	±1.636	0.1802
S_1	1	200	6.143	+10000	+0.5	0.0077	0.0	0.0
S_2	2	294.9	6.143	±25274	±1.264	0.146	0.0	0.0
S_3	2	320.2	6.143	±20581	±1.029	0.105	0.0	0.0

续表

杆件编号	杆件根数	杆件长度 l (cm)	杆件面积 A (cm²)	N_p (N)	A 点变形		B 点变形	
					$\bar{N}_1$	$\frac{\bar{N}_1 N_p}{EA}l$	$\bar{N}_2$	$\frac{\bar{N}_2 N_p}{EA}l$
S_4	1	266.7	6.875	+5000	0.0	0.0	+0.5	0.0046
S_5	2	346.8	6.875	±28901	±0.867	0.120	±1.156	0.161
S_6	2	374.5	6.875	±24969	±0.749	0.097	±0.999	0.129
S_7	2	403.1	6.875	±21988	±0.660	0.081	+0.880	0.108
S_8	2	183.3	7.367	±18182	±0.545	0.023	±0.727	0.0313
S_9	2	282.8	7.367	±25714	±0.771	0.072	±1.029	0.097
位移					$\Delta A=\sum\frac{\bar{N}_1 N_p}{EA}l=1.567\text{cm}$		$\Delta B=\sum\frac{\bar{N}_2 N_p}{EA}l=0.952\text{cm}$	

注 1. 因结构对称，荷载不对称，表中内力 N_p 值用正负号分别表示。
2. 面积都是假设的，杆件弹性模量均为 $E=2.1\times10^7\text{N/cm}^2$ 。

上述计算完全基于桁架结构的基本假定，即所有杆件由完全弹性材料做成；所有节点都是理想铰接。但在实际铁塔中，螺栓孔径一般都要比螺栓直径大 1.5mm 左右，因此在螺栓受力后螺栓中心将偏离螺孔中心，使杆件长度增长或缩短 1.5/2mm 左右，桁架变形随之增大。假定螺孔直径比螺栓直径大 e，且加工制作时螺孔中心均在理想中心位置，杆件受力后螺栓将紧靠螺孔壁，螺栓中心就位移 $e/2$ ，则由此引起的桁架位移的增大为

$$\delta=\sum\frac{n}{2}\overline{N}_1 e \qquad (8\text{-}65)$$

$$e=d_0-d$$

式中 n ——每一根杆件的连接点数；

d_0 ——螺栓孔径，mm；

d ——螺栓直径，mm。

当一根杆件两端都用螺栓连接（不论连接螺栓的个数）时 $n=2$；当杆件用对接、外包角钢（或内包角钢）连接时（见图 8-72）， $n=2$ 。

图 8-72 对接接头的松动

如上例，假定主材在 1-1、2-2 截面处用外包角钢的对接方式，连接所有斜材两端都用螺栓连接，$e=1.5\text{mm}$ ，则其变位计算如表 8-39 所列。桁架总的变位则是弹性位移［按式（8-64）］和由螺栓松动引起的位移［按式（8-65）］之和。

表 8-39 计入螺栓松动影响后的位移计算

杆件编号	杆件根数 n_1	连接点数 n	杆件长度 l (cm)	杆件面积 A (cm²)	N_p (N)	A 点变形			B 点变形		
						$\bar{N}_1$	$n_1\frac{\bar{N}_1 N_p}{EA}l$	$n_1\frac{n}{2}\bar{N}_1 e$	$\bar{N}_2$	$n_1\frac{\bar{N}_2 N_p}{EA}l$	$n_1\frac{n}{2}\bar{N}_2 e$
U_1	2	0	200.7	8.797	±8570	±0.428	0.00796	0.000	0.000	0.000	0.000
U_2	2	1	200.7	8.797	±23570	±1.178	0.06031	0.177	0.000	0.000	0.000
U_3	2	0	200.7	12.301	±38330	±1.750	0.104	0.000	±0.333	0.0198	0.000
U_4	2	0	200.7	12.301	±53330	±2.200	0.182	0.000	±0.933	0.0773	0.000
U_5	2	1	200.7	12.301	±65450	±2.563	0.261	0.384	±1.418	0.1442	0.213
U_6	2	0	200.7	12.301	±70900	±2.727	0.300	0.000	±1.636	0.1802	0.000
S_1	1	2	200	6.143	+10000	+0.5	0.0077	0.075	0.000	0.000	0.000
S_2	2	2	294.9	6.143	±25274	±1.264	0.146	0.379	0.000	0.000	0.000
S_3	2	2	320.2	6.143	±20581	±1.029	0.105	0.309	0.000	0.000	0.000
S_4	1	2	266.7	6.875	±5000	0.0	0.000	0.000	+0.5	0.0046	0.075

续表

杆件编号	杆件根数 n_1	连接点数 n	杆件长度 l（cm）	杆件面积 A（cm²）	N_p（N）	A 点变形			B 点变形		
						$\bar{N}_1$	$n_1\dfrac{\bar{N}_1 N_p}{EA}l$	$n_1\dfrac{n}{2}\bar{N}_1 e$	$\bar{N}_2$	$n_1\dfrac{\bar{N}_2 N_p}{EA}l$	$n_1\dfrac{n}{2}\bar{N}_2 e$
S_5	2	2	346.8	6.875	±28901	±0.867	0.120	0.260	±1.156	0.161	0.347
S_6	2	2	374.5	6.875	±24969	±0.749	0.097	0.225	±0.999	0.129	0.30
S_7	2	2	403.1	6.875	±21988	±0.660	0.081	0.198	+0.880	0.108	0.264
S_8	2	2	183.3	7.367	±18182	±0.545	0.023	0.164	±0.727	0.0313	0.218
S_9	2	2	282.8	7.367	±25714	±0.771	0.072	0.231	±1.029	0.097	0.309
总位移（cm）						$\Delta A = 1.567 + 2.366 = 3.933\text{cm}$			$\Delta B = 0.952 + 1.726 = 2.678\text{cm}$		

九、塔身斜材的埃菲尔效应和最小承载力要求

(一) 塔身斜材的埃菲尔效应

1. 斜材的埃菲尔效应的概念

风速作为随机过程，在空间沿着三个方向都随着时间发生变化。由于杆塔结构具有很大的空间尺度，因此不可能同时在不同的高度上达到最大风速。当杆塔某个高度处的风速达到最大值时，离该点越远的高度处，风速达到最大值的概率就越小。风速变化的这种特性，对曲线形杆塔斜材的受力影响很大。鉴于曲线形杆塔与埃菲尔杆塔外形相似，因此把这种影响称之为斜材的埃菲尔效应。曲线形杆塔斜材的埃菲尔效应，一般可采取折减系数法和剪力比法进行计算。

2. 折减系数法

折减系数法是以杆塔变坡段主材的交点为界，将杆塔分成上下两大部分，并在其上下分别作用设计风载和折减风载，从而求得风速最不利分布下斜材内力的一种方法。设计风载是指按设计基本风速和相关系数计算确定的水平风荷载，折减风载是将设计风载乘以折减系数后得到的风荷载。折减荷载法主要适用于 90° 大风或 0° 大风情况，计算步骤如下：

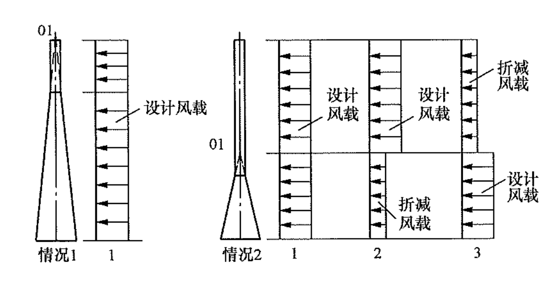
（1）首先确定杆塔每个变坡段主材交点的位置；

（2）分别以每个主材交点为界，将杆塔分成上下两个部分；

（3）在杆塔上下两个部分分别作用设计风荷载和折减风荷载，组成若干不同的荷载工况；

（4）与其他荷载组合工况一起进行电算，即可求得斜材的最大内力。

图 8-73 中情况 1，变坡段主材交点位于塔顶以上，不构成上下两部分的情况，仅需按设计风载计算即可；情况 2，变坡段主材交点位于塔身内，将杆塔分成上下两部分，应按图示荷载计算 3 个工况；情况 3，塔身有 3 个坡度段，主材的两个交点都位于塔身内，应按图示荷载计算 5 个工况。当杆塔具有更多坡段时，可按以上方法类推。



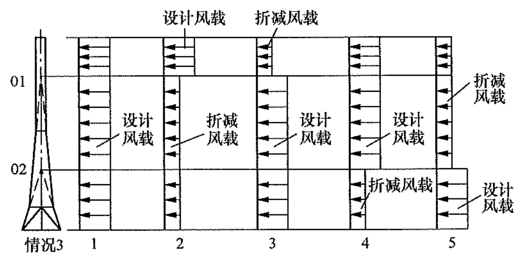


图 8-73 折减法荷载工况示意图

折减系数的数值可按表 8-40 取用。

表 8-40 折减系数表

塔 型	风荷载	线条张力
悬垂直线塔	0.3	—
转角塔（包括悬垂转角塔）	0.3	0.8

3. 剪力比法

剪力比法是根据杆塔斜材和主材承担的剪力比，求得风速最不利分布时斜材内力的一种方法，我国 2007 年开始实施的 GB 50135—2006《高耸结构设计规范》，针对杆塔斜材的埃菲尔效应列出了相应的计算公式，规定当计算所得四边形钢塔斜杆的剪力与同层塔柱承担的剪力比 $\Delta = \left|\dfrac{Vb}{\sqrt{2}M\tan\theta} - 1\right| \leqslant 0.4$ 时，斜杆

内力取塔柱内力乘以系数α（见图 8-74），α可按式（8-66）确定。

$$\alpha=\mu(0.228+0.649\Delta)\frac{b}{h} \tag{8-66}$$

式中　V、M ——层顶剪力、弯矩，N·mm；

b ——层顶宽度，mm；

θ ——塔柱与铅直线之夹角，（°）；

h ——计算截面以上塔体高度，mm；

μ ——系数，刚性斜杆取 1.0，柔性斜杆取 2.0。

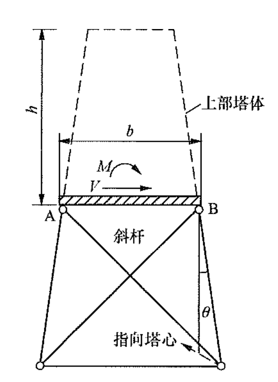


图 8-74　斜杆计算简图

4. 其他

当曲线形杆塔斜材没有按照折减系数法或剪力比法计及埃菲尔效应时，为了保证斜材具有足够的承载能力，其设计内力不宜小于主材内力的 3%。

（二）塔身斜材的最小承载力要求

斜材的最小承载力要求应按以下方法确定。

杆塔斜材不但要传递外部荷载产生的剪力，同时也对主材稳定起到关键的支撑作用。因此，斜材的内力不但应按外部荷载计算确定，而且还应满足维持主材稳定所必需的强度和刚度要求。

为了确保斜材对主材的有效支撑，应与辅助材一样，按主材内力的百分比值计算内力。斜材不但自身起到支撑主材的作用，还要承受辅助材在维持主材稳定中产生的荷载，因此，斜材的最小承载力宜按 2.5%主材内力计算的荷载确定。计算时应将 2.5%的主材内力作用在斜材平面内、垂直于主材轴线的节点上。

对于受力斜材，应按 2.5%主材内力计算的荷载和与其相同的计算长度和长细比进行最小承载力校验；对称荷载作用下不受力的斜材，如图 8-75 所示的左侧面斜材，应按 2.5%主材内力计算的荷载和全长平行轴进行最小承载力校验。

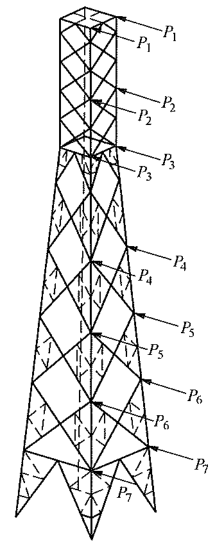


图 8-75　对称荷载示意图

第五节　拉线杆塔内力分析及变形计算

一、拉线应力和变形计算

（一）拉线状态方程式

根据极限状态设计方法，拉线受力分析荷载取荷载设计值，其变形计算取荷载标准值。具体计算时根据设计标准进行调整。

按照柔索理论，悬挂在 A、B 两点的拉线（如图 8-76 所示）的状态方程式为

$$\sigma_i-\sigma_0=\frac{E_{\mathrm{T}}l^2}{24A^2}\left(\frac{q_i^2}{\sigma_i^2}-\frac{q_0^2}{\sigma_0^2}\right)\pm\frac{E_{\mathrm{T}}\Delta l}{l}\mp\alpha E_{\mathrm{K}}(t_i-t_0)\cos^2\beta \tag{8-67}$$

式中　σ_0、σ_i ——在初始状态和某一计算状态下的拉线应力，N/mm^2；

q_0、q_i ——在初始状态和某一计算状态下作用在拉线上的荷载，N/m；

t_0、t_i ——在初始状态和某一计算状态下的温度，（°）；

E_{T} ——拉线的弹性模量，如果拉线使用钢绞线做成，则 E_{T} =160000 N/mm^2；

l ——拉线的长度，m；

A ——拉线的横截面面积，mm^2；

Δl ——拉线支撑点的位移，mm；

α ——拉线的线膨胀系数；

β ——拉线对地夹角，（°）。

在工程设计中，一般可不考虑温度的影响，故式

（8-67）可简化为

$$\sigma_i-\sigma_0=\frac{E_T l^2}{24A^2}\left(\frac{q_i^2}{\sigma_i^2}-\frac{q_0^2}{\sigma_0^2}\right)\pm\frac{E_T\Delta l}{l} \tag{8-68}$$

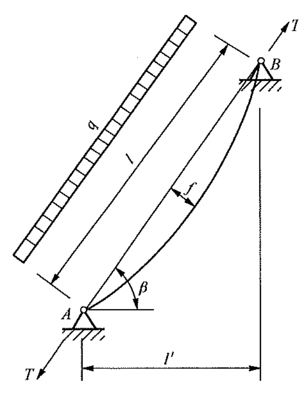


图 8-76 拉线的计算简图

拉线一般都呈空间布置，拉线方向与荷载方向往往不在同一平面内，因此，即使在同一计算状态下各条拉线的荷载 q 及伸长量Δl 也各不相同，故在计算拉线内力时必须对每一条拉线按式（8-68）建立方程，并与拉线点的内、外力平衡方程联立求解。

（二）作用在拉线上的荷载

作用在拉线上的荷载有拉线自重力、风荷载、覆冰和拉线金具的重力，后者由于常设在拉线的两端一般可略。

现以拉线呈对称布置的单杆为例，说明作用在拉线上的荷载计算。

如图 8-77 所示的拉线单杆，拉线与横担方向间的夹角 φ，拉线对地夹角 β，拉线横截面积 A（mm²）、单位长度的重力 $\overline{q}$（N/m）、单位长度的风荷载 W(N/m）及长度 l（m）。

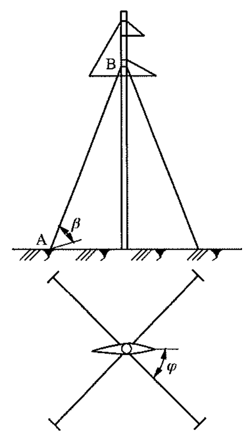


图 8-77 拉线单杆简图

1. 拉线自重力

拉线自重力总是作用在拉线平面内且垂直于地面（如图 8-78 所示），故可将其分解成垂直于拉线轴线的 $\overline{q_y}$ 和顺拉线轴线的 $\overline{q_x}$ 两个分量，即

$$\overline{q_x}=\overline{q}\sin\beta;\quad \overline{q_y}=\overline{q}\cos\beta \tag{8-69}$$

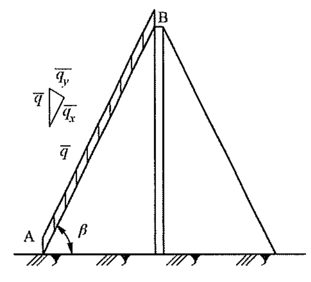


图 8-78 拉线自重力计算图

2. 拉线风荷载

风荷载总是平行于地面，但与各条拉线之间的夹角是任意的。现设风荷载方向与杆塔横担方向之间的夹角为 θ，则风荷载在各拉线平面内的分量是

$$\left.\begin{aligned}w_{x1}=w_{x3}=w\cos(\varphi-\theta)\\ w_{x2}=w_{x4}=w\cos(\varphi+\theta)\end{aligned}\right\} \tag{8-70}$$

拉线负荷载计算图如图 8-79 所示。

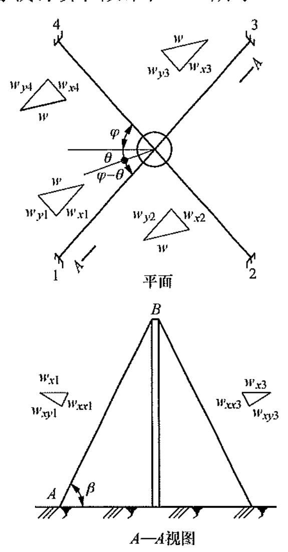


图 8-79 拉线风荷载计算图

作用在拉线平面内且又垂直于拉线轴线的分量为

$$\left.\begin{aligned}W_{xy1}=W_{xy3}=W_{x1}\sin\beta=W\cos(\varphi-\theta)\sin\beta\\ W_{xy2}=W_{xy4}=W_{x2}\sin\beta=W\cos(\varphi+\theta)\sin\beta\end{aligned}\right\} \tag{8-71}$$

垂直于拉线平面的风荷载分量为

$$\left.\begin{aligned}W_{y1}=W_{y3}=W\sin(\varphi-\theta)\\ W_{y2}=W_{y4}=W\sin(\varphi+\theta)\end{aligned}\right\} \tag{8-72}$$

这样，垂直于拉线轴线方向的荷载分量有 $\overline{q_y}$、W_{xy}、W_y，它们的合力为

$$\left.\begin{aligned}
\text{拉线(1)}q_1 &= \sqrt{W_{y1}^2+(W_{xy1}+\overline{q}_y)^2} \\
&= \sqrt{W^2\sin^2(\varphi-\theta)+[W\cos(\varphi-\theta)\sin\beta+\overline{q}\cos\beta]^2} \\
\text{拉线(2)}q_2 &= \sqrt{W_{y2}^2+(W_{xy2}-\overline{q}_y)^2} \\
&= \sqrt{W^2\sin^2(\varphi+\theta)+[W\cos(\varphi+\theta)\sin\beta-\overline{q}\cos\beta]^2} \\
\text{拉线(3)}q_3 &= \sqrt{W_{y3}^2+(W_{xy3}-\overline{q}_y)^2} \\
&= \sqrt{W^2\sin^2(\varphi-\theta)+[W\cos(\varphi-\theta)\sin\beta-\overline{q}\cos\beta]^2} \\
\text{拉线(4)}q_4 &= \sqrt{W_{y4}^2+(W_{xy4}+\overline{q}_y)^2} \\
&= \sqrt{W^2\sin^2(\varphi+\theta)+[W\cos(\varphi+\theta)\sin\beta+\overline{q}\cos\beta]^2}
\end{aligned}\right\} \tag{8-73}$$

顺拉线轴线方向的分量对拉线内力的变化影响极小，可予略去。

（三）拉线伸长量的计算

杆塔受荷载后拉线将伸长或缩短，杆塔发生位移，拉线点 B 将位移至 B'点，如荷载作用在拉线对称平面内，则 B'点仍将在此对称平面内，否则 BB'点将与荷载方向之间有一夹角 γ（如图 8-80 所示），则

$$\left.\begin{aligned}
&\text{拉线(1)伸长}\Delta l_1 = y'\cos\beta = y\cos(\varphi-\theta+\gamma)\cos\beta \\
&\text{拉线(2)缩短}\Delta l_2 = y''\cos\beta = y\cos(\varphi+\theta-\gamma)\cos\beta \\
&\text{拉线(3)缩短}\Delta l_3 = y'\cos\beta = y\cos(\varphi-\theta+\gamma)\cos\beta \\
&\text{拉线(4)伸长}\Delta l_4 = y''\cos\beta = y\cos(\varphi+\theta-\gamma)\cos\beta
\end{aligned}\right\} \tag{8-74}$$

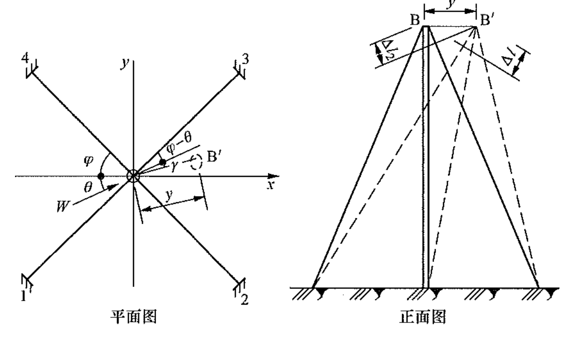


图 8-80　拉线伸长量的计算图

（四）拉线方程式

将式（8-74）计算结果代入拉线状态方程式（8-68）可得

$$\left.\begin{aligned}
\sigma_1-\frac{A_1}{\sigma_1^2} &= B+b\cos(\varphi-\theta+\gamma) \\
\sigma_2-\frac{A_2}{\sigma_2^2} &= B-b\cos(\varphi+\theta-\gamma) \\
\sigma_3-\frac{A_3}{\sigma_3^2} &= B-b\cos(\varphi-\theta+\gamma) \\
\sigma_4-\frac{A_4}{\sigma_4^2} &= B+b\cos(\varphi+\theta-\gamma)
\end{aligned}\right\} \tag{8-75}$$

式中　$A_i = q_i^2 l^2 E_T / 24A^2$（$i$ 为拉线代号）

$$B = \sigma_0 - q_0^2 l^2 E_T / (24A^2\sigma_0^2)$$

$$b = y\cos\beta E_T / l$$

（五）拉线点平衡方程式

在式（8-75）中共有六个未知数 σ_1、σ_2、σ_3、σ_4、y、γ，必须有 6 个方程式才能求解。可以利用拉线点的静力平衡条件建立两个平衡方程式。设作用在拉线点的荷载为 R_x 和 R_y（R_x、R_y 可据不同杆型计算），则

$$\left.\begin{aligned}
&\sum X = 0 \\
&(\sigma_1-\sigma_2-\sigma_3+\sigma_4)A\cos\varphi\cos\beta - R_x = 0 \\
&\sum Y = 0 \\
&(\sigma_1+\sigma_2-\sigma_3-\sigma_4)A\sin\varphi\cos\beta - R_y = 0
\end{aligned}\right\} \tag{8-76}$$

（六）拉线计算的简化

在杆塔设计中很多情况下的荷载是作用在拉线对称平面内的，此时 θ=0、γ=0，则式（8-75）可简化为

$$\left.\begin{aligned}
\sigma_1-\frac{A_1}{\sigma_1^2} &= B+b\cos\varphi \\
\sigma_2-\frac{A_2}{\sigma_2^2} &= B-b\cos\varphi \\
\sigma_3-\frac{A_3}{\sigma_3^2} &= B-b\cos\varphi \\
\sigma_4-\frac{A_4}{\sigma_4^2} &= B+b\cos\varphi
\end{aligned}\right\} \tag{8-77}$$

在实用上还常忽略作用在拉线上的风冰荷载，则有 $\sigma_1=\sigma_4$、$\sigma_2=\sigma_3$、$q_i=q_0$、$A_1=A_2=A_3=A_4=A_0$，式（8-77）可进一步简化为

$$\left.\begin{aligned}
\sigma_1-\frac{A_0}{\sigma_1^2} &= B+b\cos\varphi \\
\sigma_2-\frac{A_0}{\sigma_2^2} &= B-b\cos\varphi
\end{aligned}\right\} \tag{8-78}$$

式（8-76）可简化为

$$2(\sigma_1-\sigma_2)A_0\cos\varphi\cos\beta - R_x = 0 \tag{8-79}$$

由此可得

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_p}{2\cos\varphi} + \sqrt{\frac{A_0}{2(\sigma_1-B)-\dfrac{\sigma_p}{2\cos\varphi}-\dfrac{A_0}{\sigma_1^2}}} \tag{8-80}$$

式中：$\sigma_p = R_x / A_0\cos\beta$，N/mm²。

式（8-80）是一个隐函数，可用试凑法求解。

在工程设计中往往只需算出拉线的最大受力，以满足选择拉线截面的需要。分析式（8-80）可以看出，当 σ_p 足够大时，式（8-80）中后面部分趋近于零，故常用下式来简化计算，即

$$\sigma_1 = 1.05\frac{\sigma_p}{2\cos\varphi} \tag{8-81}$$

（七）拉线点位移计算

由式（8-77）的第一式，可得拉线点位移

$$y=\left(\sigma_1-\frac{A_0}{\sigma_1^2}-B\right)l/E_T\cos\varphi\cos\beta \qquad (8\text{-}82)$$

或者忽略拉线上的荷载后得

$$y\approx(\sigma_1-\sigma_0)l/E_T\cos\varphi\cos\beta \qquad (8\text{-}83)$$

二、门型和V型拉线杆塔计算

220～500kV输电线常采用门型和V型拉线杆塔。这两种杆塔因拉线在横担上的位置不同，有四种不同形式（见图8-81）。现以图8-81（a）的门型拉线塔为例说明其内力计算方法。

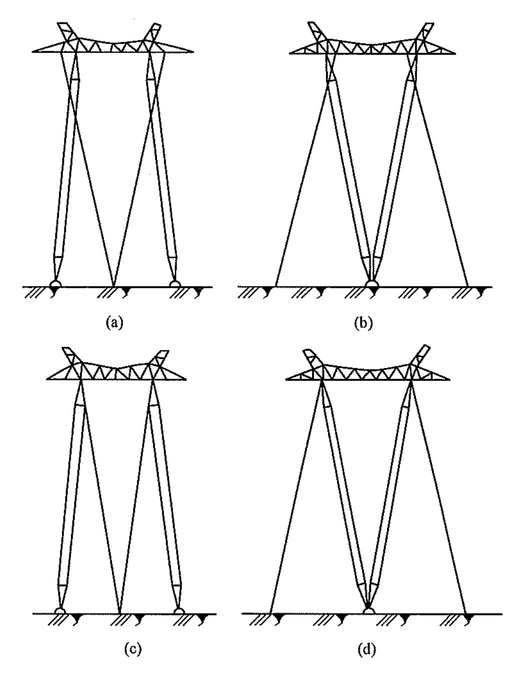


图8-81 四种常见的门型和V型拉线杆塔
（a）、（c）门型拉线杆塔；
（b）、（d）V型拉线杆塔

在荷载作用下，杆塔共有八个未知量：拉线内力T_1、T_2、T_3、T_4（或其应力σ_1、σ_2、σ_3、σ_4）；主柱（杆）内力N_A、N_B；及主柱（杆）底部纵向反力R_A、R_B，如图8-82所示。

由静力平衡条件可建立六个平衡方程式，即

$$\left.\begin{aligned}
&\sum X=0\\
&-A(\sigma_1+\sigma_4-\sigma_2-\sigma_3)\cos\varphi\cos\beta-\\
&(N_A-N_B)\cos\gamma+P=0\\
&\sum Y=0\\
&A(\sigma_1+\sigma_2-\sigma_3-\sigma_4)\sin\varphi\cos\beta+R_A+R_B+S=0\\
&\sum Z=0\\
&A(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3+\sigma_4)\sin\beta-(N_A+N_B)\sin\gamma+G=0\\
&\sum M_x=0\\
&(R_A+R_B)H+M_x=0\\
&\sum M_y=0\\
&A(\sigma_1-\sigma_2-\sigma_3+\sigma_4)\sin\beta l_0-(N_A-N_B)\\
&\sin\gamma(l+t)+M_y=0\\
&\sum M_z=0\\
&A(\sigma_1-\sigma_2+\sigma_3-\sigma_4)\sin\varphi\cos\beta l_0+(R_A-R_B)\\
&(l+t)+M_z=0
\end{aligned}\right\} \qquad (8\text{-}84)$$

式中：M_x、M_y、M_z——荷载P、S、G对x、y、z轴的力矩，N·m；

A——拉线横截面面积，mm²；

P、S、G——作用在杆塔上的横向、纵向和垂直荷载，N；

$\sigma_1\sim\sigma_4$——拉线1～4的应力，N/mm²。

其他符号的含义如图8-82所示。

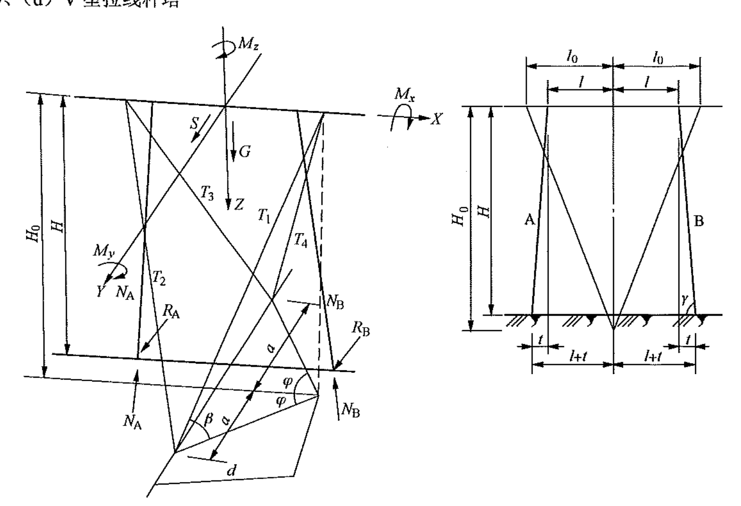


图8-82 门型拉线塔计算简图

本塔共有四根拉线，可按式（8-68）列出四个拉线方程式，即

$$\left.\begin{aligned}\sigma_1-\sigma_0&=\frac{q_1^2L^2E_T}{24A^2}\frac{1}{\sigma_1^2}-\frac{q_0^2L^2E_T}{24A^2}\frac{1}{\sigma_0^2}+\frac{\Delta l_1}{L}E_T\\\sigma_2-\sigma_0&=\frac{q_2^2L^2E_T}{24A^2}\frac{1}{\sigma_2^2}-\frac{q_0^2L^2E_T}{24A^2}\frac{1}{\sigma_0^2}+\frac{\Delta l_2}{L}E_T\\\sigma_3-\sigma_0&=\frac{q_3^2L^2E_T}{24A^2}\frac{1}{\sigma_3^2}-\frac{q_0^2L^2E_T}{24A^2}\frac{1}{\sigma_0^2}+\frac{\Delta l_3}{L}E_T\\\sigma_4-\sigma_0&=\frac{q_4^2L^2E_T}{24A^2}\frac{1}{\sigma_4^2}-\frac{q_0^2L^2E_T}{24A^2}\frac{1}{\sigma_0^2}+\frac{\Delta l_4}{L}E_T\end{aligned}\right\}\tag{8-85}$$

式中 Δl_1、Δl_2、Δl_3、Δl_4——各根拉线的伸长，m；

L——拉线长度，这里假定四根拉线的长度相同，m。

其他符号含义同前。

式（8-85）中引进了四根拉线的伸长量 Δl_i，可由几何关系将它们转换成杆塔的位移 ΔX、ΔY 和横担顺线路方向的转角 ψ 来表示，如图 8-83 所示。

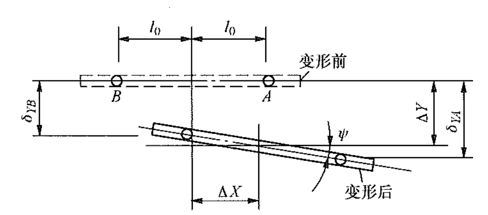


图 8-83 杆塔变形平面图

$$\left.\begin{aligned}\delta_{YA}&=\Delta Y+\psi l_0\\\delta_{YB}&=\Delta Y-\psi l_0\end{aligned}\right\}\tag{8-86}$$

各根拉线的伸长量可用式（8-87）表示，即

$$\left.\begin{aligned}\Delta l_1&=\Delta X\cos\varphi\cos\beta-\delta_{YA}\sin\varphi\cos\beta\\&=\Delta X\frac{d}{L}-(\Delta Y+\psi l_0)\frac{a}{L}\\\Delta l_2&=-\Delta X\cos\varphi\cos\beta-\delta_{YB}\sin\varphi\cos\beta\\&=-\Delta X\frac{d}{L}-(\Delta Y-\psi l_0)\frac{a}{L}\\\Delta l_3&=-\Delta X\cos\varphi\cos\beta+\delta_{YB}\sin\varphi\cos\beta\\&=-\Delta X\frac{d}{L}+(\Delta Y-\psi l_0)\frac{a}{L}\\\Delta l_4&=\Delta X\cos\varphi\cos\beta+\delta_{YA}\sin\varphi\cos\beta\\&=\Delta X\frac{d}{L}+(\Delta Y+\psi l_0)\frac{a}{L}\end{aligned}\right\}\tag{8-87}$$

式中 δ_{YA}、δ_{YB}——拉线点 A、B 的位移，m；

ΔX——杆塔横向位移，m；

ΔY——杆塔纵向位移，m；

ψ——横担绕 Z 轴的转角，（°）。

式（8-85）可写成

$$\left.\begin{aligned}\sigma_1-\sigma_0&=\frac{L^2E_T}{24A^2}\left(\frac{q_1^2}{\sigma_1^2}-\frac{q_0^2}{\sigma_0^2}\right)+\frac{E_T}{L^2}[\Delta Xd-(\Delta Y+\psi l_0)a]\\\sigma_2-\sigma_0&=\frac{L^2E_T}{24A^2}\left(\frac{q_2^2}{\sigma_2^2}-\frac{q_0^2}{\sigma_0^2}\right)-\frac{E_T}{L^2}[\Delta Xd+(\Delta Y-\psi l_0)a]\\\sigma_3-\sigma_0&=\frac{L^2E_T}{24A^2}\left(\frac{q_3^2}{\sigma_3^2}-\frac{q_0^2}{\sigma_0^2}\right)-\frac{E_T}{L^2}[\Delta Xd-(\Delta Y-\psi l_0)a]\\\sigma_4-\sigma_0&=\frac{L^2E_T}{24A^2}\left(\frac{q_4^2}{\sigma_4^2}-\frac{q_0^2}{\sigma_0^2}\right)+\frac{E_T}{L^2}[\Delta Xd+(\Delta Y+\psi l_0)a]\end{aligned}\right\}\tag{8-88}$$

在式（8-84）和式（8-88）中共有十个方程，但有十一个未知数，第十一个方程可根据横担中部截面的变形（扭转）条件建立变形谐调方程。

从杆塔的侧面看，两个柱（杆）子顶部的纵向位移是不同的，因而横担既受弯又受扭。

从几何条件看，拉线点处横担截面发生扭转后横担底平面与水平面间的夹角（见图 8-84）为

$$\theta=\frac{\delta}{H}=\frac{(l+t)}{H}\psi$$

左右两个拉线点处横担底面的相对转角为

$$2\theta=\frac{2(l+t)}{H}\psi$$

从物理条件看，在主柱（杆）底部纵向反力 R_A、R_B 作用下横担截面将发生扭转变形。设 ζ 为单位扭矩作用在横担与主柱（杆）连接点处的横担截面上时，该截面与横担中部截面的相对转角。则在 R_A 作用时上述两截面的相对扭转变位为

$$R_AH\zeta+\frac{R_AH^2}{3EJ}$$

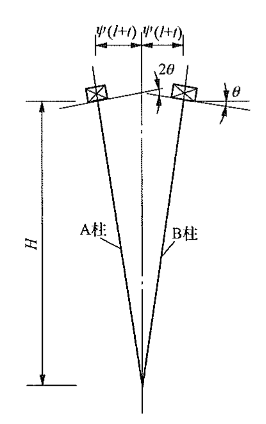


图 8-84 横担上两拉线点截面相对变形

同样在 R_B 作用下左侧拉线点处横担截面对横担中部截面的扭转变位为

$$R_B H\zeta + \frac{R_B H^2}{3EJ}$$

两个拉线点处横担截面的相对扭转为上述两式之差（假定 R_A 与 R_B 的方向相同），它应与前述几何条件相符，即

$$\left.\begin{aligned}&\frac{2(l+t)}{H}\psi = R_A H\zeta + \frac{R_A H^2}{3EJ} - \left(R_B H\zeta + \frac{R_B H^2}{3EJ}\right)\\ \text{或}\quad &2(l+t)\psi = (R_A - R_B)H^2\zeta + \frac{H^3}{3EJ}(R_A - R_B)\end{aligned}\right\} \tag{8-89}$$

用式（8-84）的六个静力平衡方程、式（8-87）四个拉线方程和式（8-89）的变形方程可求解所有未知数。

对拉 V 塔也可用类似方法计算。

在实际工程中往往只需计算拉线的最大拉力；加之某些组合荷载的对称性，利用这些条件可使计算大为简化。现分别说明（以下均指荷载大到足以使一侧拉线应力减小到接近于零的特殊情况）。

（一）横向对称荷载作用下的计算

横向荷载（如横向风荷载）对称于杆塔平面时，S=0、ΔY=0、ψ=0、θ=0、$R_A = R_B = 0$、$\sigma_1 = \sigma_4$、$\sigma_2 = \sigma_3 = 0$。利用 ΣX=0、ΣY=0 和 ΣZ=0 三个方程即可求解：

$$\left.\begin{aligned}&T_1 = T_4 = \frac{L}{2\left(d + \dfrac{H_0 l_0}{Hl}t\right)}\left(p - M_Y\frac{t}{Hl}\right)\\ &T_2 = T_3 = 0\\ &N_A = \frac{l_c}{H}\left[(T_1+T_4)\frac{H_0}{L}\frac{l_0 - l}{2l} + \frac{G}{2} - \frac{M_Y}{2l}\right]\\ &N_B = \frac{l_c}{H}\left[(T_1+T_4)\frac{H_0}{L}\frac{l_0 + l}{2l} + \frac{G}{2} + \frac{M_Y}{2l}\right]\end{aligned}\right\} \tag{8-90}$$

式中 l_c——主柱（杆）长度，m；

L——拉线长度，m。

其他符号含义如图 8-82 所示。

（二）纵向对称荷载作用下的计算

纵向对称荷载（如断中导线、纵向风）对称于 YOZ 平面，因而 $T_1 = T_2$、$T_3 = T_4 \approx 0$、$R_A = R_B$、ψ=0、ΔX=0，利用式（8-84）中的 ΣY=0、ΣM_X=0 两式可得

$$\left.\begin{aligned}&T_1 = T_2 = \frac{L}{a}\left(-\frac{S}{2} + \frac{M_X}{2H}\right)\\ &R_A = R_B = -\frac{M_X}{2H}\\ &T_3 = T_4 = 0\\ &N_A = N_B = \frac{l_c}{2H}\left[(T_1+T_2)\frac{H_0}{L} + G\right]\end{aligned}\right\} \tag{8-91}$$

三、拉线门型杆的简化计算

（一）带 V 型外拉线的门型杆在横向荷载下的计算

带 V 型外拉线的双杆如图 8-85（a）所示。

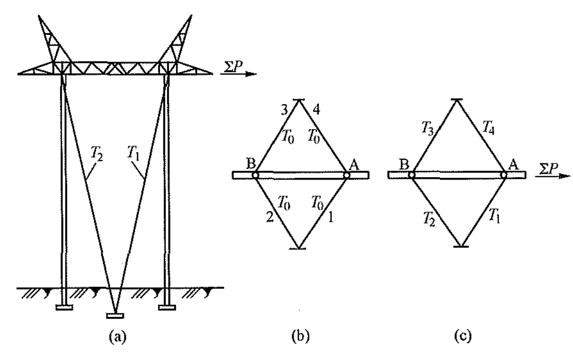


图 8-85 带 V 型外拉线的门型杆

（a）外形图；（b）初始状态下拉线受力情况；（c）在横向荷载下拉线受力情况

初始状态下四根拉线的内力都是 T_0，如图 8-85(b) 所示。在横向荷载由零逐渐增加的过程中，拉线 1、4 的受力逐渐增加，拉线 2、3 的内力逐渐减小并趋于零。由于 AB 间横担的抗拉刚度很大，可假定 A、B 两点间的相对位移为零，即 $\delta_{XA} = \delta_{XB}$，所以在拉线 2、3 的内力减到零之前，拉线 1、4 内力的增量与拉线 2、3 内力的减小量是相同的，即 $\Delta T_1 = \Delta T_4 = -\Delta T_2 = -\Delta T_3$，或者说是由四根拉线共同承受外荷载 $\sum P$，当荷载继续增大，拉线 2、3 退出工作，外荷载完全由拉线 1、4 承担，故

1. 当 $\sum P < 2T_0 \cos\varphi \cos\beta$ 时

$$\left.\begin{aligned}&T_1 = T_4 = T_0 + \frac{1}{4}\sum P/\cos\varphi\cos\beta\\ &T_2 = T_3 = T_0 - \frac{1}{4}\sum P/\cos\varphi\cos\beta\end{aligned}\right\} \tag{8-92}$$

2. 当 $\sum P > 2T_0 \cos\varphi \cos\beta$ 时

$$\left.\begin{aligned}&T_2 = T_3 \approx 0\\ &T_1 = T_4 = \frac{1}{2}\sum P/\cos\varphi\cos\beta\end{aligned}\right\} \tag{8-93}$$

（二）带 V 型拉线的门型杆在断边导线时的计算

在初始状态下电杆的受力与前述相同。当横担一端作用有纵向荷载 ΔT 以后，两个拉线点的纵向反力可按简支梁计算支座反力的方法计算 ($R_A > R_B$)，现取 A 点为割离体（见图 8-86），当 R_A 由零增加到某一数值时，拉线 4 将逐渐由 T_0 增加到 $2T_0$，拉线 1 逐渐由 T_0 减小到零。它们的横向合力 $2T_0 \sin\varphi\cos\beta$。$R_A$ 继续增大，拉线 1 将退出工作，拉线 4 的内力增至 $R_A/\sin\varphi\cos\beta$，P_A 则变为 $P_A = T_4\cos\varphi\cos\beta$，并通过横担对 B 点产生一个向左的推力 $P_B = P_A$，所以

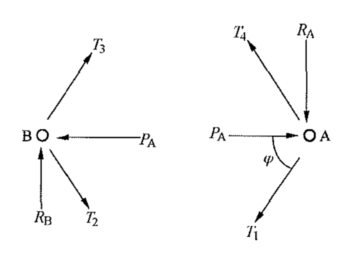


图 8-86 带 V 型外拉线的门型杆在纵向荷载作用下拉线受力情况

（1）当 $R_A < 2T_0\sin\varphi\cos\beta$ 时，也就是 $2T_0\cos\varphi\times\cos\beta > R_A/\tan\varphi$ 时，R_A 与 $2T_0\cos\varphi\cos\beta$ 的合力的方向在 T_4 延长线的右上方，拉线 1 和 4 将共同承担荷载 R_A，但它们在横担方向的合力仍为 $2T_0\cos\varphi\cos\beta$，故

$$\left.\begin{aligned}
&T_4 = T_0 + R_A/2\sin\varphi\cos\beta\\
&T_1 = T_0 - R_A/2\sin\varphi\cos\beta\\
&T_2 = T_0 + R_B/2\sin\varphi\cos\beta\\
&T_3 = T_0 - R_B/2\sin\varphi\cos\beta\\
&N_A = \left[(T_1+T_4)\sin\beta + \frac{\sum G}{2} + \frac{\sum M_Y}{2l}\right]/\sin\theta\\
&N_B = \left[(T_2+T_3)\sin\beta + \frac{\sum G}{2} - \frac{\sum M_Y}{2l}\right]/\sin\theta
\end{aligned}\right\}\tag{8-94}$$

（2）当 $P_A > 2T_0\cos\varphi\cos\beta$ 时，也就是 $R_A/\tan\varphi > 2T_0\cos\varphi\cos\beta$ 时，R_A 与 $2T_0\cos\varphi\cos\beta$ 的合力线在 T_4 延长线的右下方，此时拉线 1 退出工作，所以

$$\left.\begin{aligned}
&T_1 = 0\\
&T_4 = R_A/\sin\varphi\cos\beta\\
&T_2 = T_4/2 + R_B/2\sin\varphi\cos\beta\\
&T_3 = T_4/2 - R_B/2\sin\varphi\cos\beta
\end{aligned}\right\}\tag{8-95}$$

N_A、N_B 的计算与式（8-94）相同。

（三）带 V 型外拉线的门型杆在横向和纵向荷载联合作用下的计算

（1）如果 $R_A/\tan\varphi < P_A = 2T_0\cos\varphi\cos\beta + \dfrac{\sum P}{2}$，则

$$\left.\begin{aligned}
&T_4 = T_0 + \frac{R_A}{2\sin\varphi\cos\beta} + \frac{\sum P}{4\cos\varphi\cos\beta}\\
&T_1 = T_0 - \frac{R_A}{2\sin\varphi\cos\beta} + \frac{\sum P}{4\cos\varphi\cos\beta}\\
&T_2 = T_0 + \frac{R_B}{2\sin\varphi\cos\beta} - \frac{\sum P}{4\cos\varphi\cos\beta}\\
&T_3 = T_0 - \frac{R_B}{2\sin\varphi\cos\beta} - \frac{\sum P}{4\cos\varphi\cos\beta}
\end{aligned}\right\}\tag{8-96}$$

（2）如果 $R_A/\tan\varphi > P_A = 2T_0\cos\varphi\cos\beta + \dfrac{\sum P}{2}$，则

$$\left.\begin{aligned}
&T_1 = 0\\
&T_4 = \frac{R_A}{\sin\varphi\cos\beta}\\
&T_2 = (-\textstyle\sum P + T_4\cos\varphi\cos\beta)/2\cos\varphi\cos\beta +\\
&\quad R_B/2\sin\varphi\cos\beta\\
&T_3 = (-\textstyle\sum P + T_4\cos\varphi\cos\beta)/2\cos\varphi\cos\beta -\\
&\quad R_B/2\sin\varphi\cos\beta
\end{aligned}\right\}\tag{8-97}$$

（四）带八字拉线的门型双杆在横向荷载作用下的计算

图 8-87 所示带八字拉线的门型双杆，在横向荷载作用下，可假定两组拉线各承受 $\frac{1}{2}\sum P$，则各拉线受力为

$$T_1 = T_2 = T_3 = T_4 = \sum P/4\cos\varphi\cos\beta \tag{8-98}$$

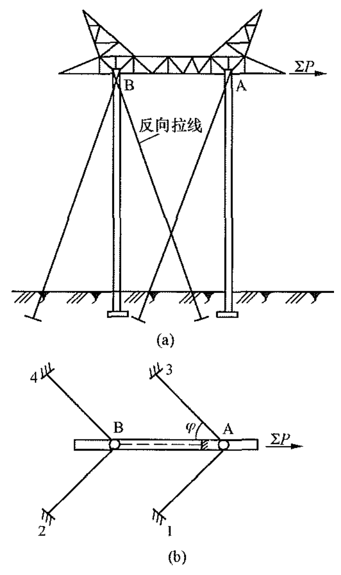


图 8-87 带八字拉线的门型双杆在横向荷载作用下的计算简图

（a）外形图；（b）平面图

（五）带八字拉线的门型杆在纵向和横向荷载联合作用下的计算

带八字拉线的门型杆在纵向和横向荷载联合作用下时，假定横向荷载由两组拉线平均分担，纵向荷载则按简支反力 R_A、R_B 分配在 A、B 两点（如图 8-88 所示），则

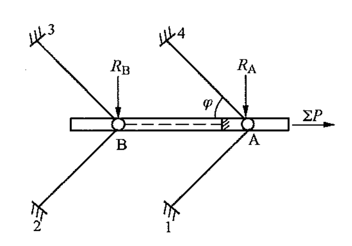


图 8-88 带八字拉线的门型杆在纵向和横向荷载联合作用下的计算简图

1. 当 $R_A/\tan\varphi < \frac{1}{2}\sum P$ 时

$$\left.\begin{aligned}T_4 &= T_0 + \frac{\sum P}{4\cos\varphi\cos\beta} + \frac{R_A}{2\sin\varphi\cos\beta}\\ T_1 &= T_0 + \frac{\sum P}{4\cos\varphi\cos\beta} - \frac{R_A}{2\sin\varphi\cos\beta}\end{aligned}\right\} \tag{8-99}$$

2. 当 $R_A/\tan\varphi > \frac{1}{2}\sum P$ 时

$$\left.\begin{aligned}T_4 &= R_A/\sin\varphi\cos\beta\\ T_1 &= 0\end{aligned}\right\} \tag{8-100}$$

计算 T_2、T_3 时可将 R_A 换成 R_B。

当四根拉线内力都算出后，需检查杆塔是否会向 $\sum P$ 相反的方向倾倒，如果

$$(T_1+T_2+T_3+T_4)\cos\varphi\cos\beta > \sum P \tag{8-101}$$

表示杆塔将向与 $\sum P$ 相反的方向倾倒，此时杆塔必须设置反向拉线。

其他形式的双杆，在算得 $\sum P$、R_A、R_B 后，拉线内力亦可参考上述方法计算。

四、双层及多层拉线杆塔内力计算

（一）基本假设

设柱（杆）身为一支撑在弹性支座上的多跨连续梁，在任一跨 L_k 中作用有均布荷载 q_k、集中荷载 P_0，在支座上作用有偏心弯矩 $M_{\varepsilon k}$，如图 8-89 所示。

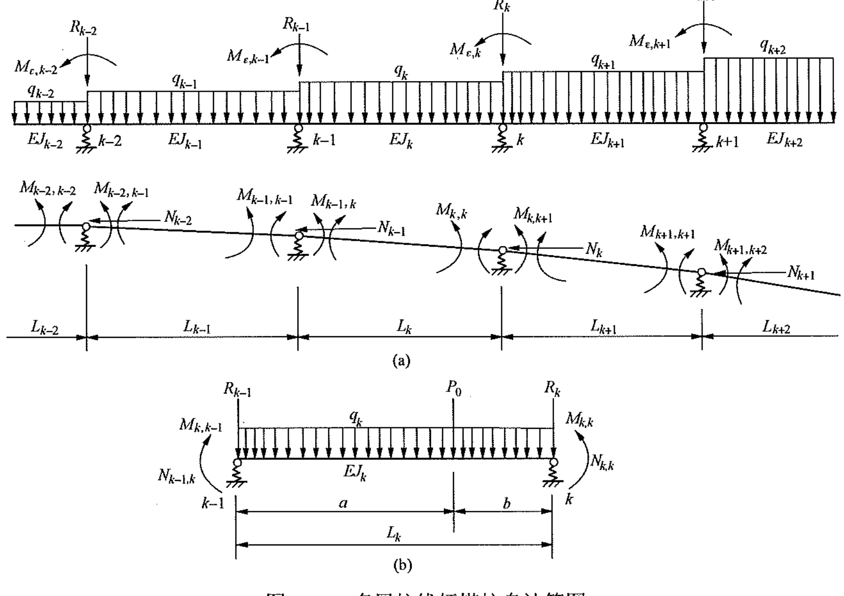


图 8-89 多层拉线杆塔柱身计算图

（a）柱身计算图；（b）任一跨柱身计算图

M—支座左边或者右边的弯矩，N·m；N—支座上的纵向力，N；P_0—作用在跨中的横向集中荷载，N；

q—作用在跨中的横向均布荷载，N；M_ε—作用在支座上的偏心弯矩，N·m；

P—支座上的横向反力，N；EJ—柱（杆）身抗弯刚度，N·m⁴

图中下标 k、$k+1$…代表第 k 跨、第 $k+1$ 跨…，用于 M，N 时第一下标代表支座编号，第二个下标代表属于第几跨，如 $M_{k-1,k}$，代表作用在第 $k-1$ 号支座对 k 跨作用的弯矩。

（二）柱（杆）身内力计算

根据结构力学原理在每一个支座上可以建立力矩方程和切力方程，如式（8-102）和式（8-103）所示，即

$$a_k M_{k-1} + (b_k + b_{k+1})M_k + a_{k+1}M_{k+1} + \frac{6}{L_k}Y_{k-1} + \left(b_k\varepsilon_k Y_k - \frac{6}{L_k} - \frac{6}{L_{k-1}}\right)Y_k + \left(a_{k+1}\varepsilon_{k+1}V_{k+1} + \frac{6}{L_{k+1}}\right)Y_{k+1} = -\frac{C_k q_k L_k^2}{4} - \frac{C_{k+1}q_{k+1}L_{k+1}^2}{4} - E_T P_0 \tag{8-102}$$

$$P_k=\frac{M_{k-1}}{L_k}+\left(\frac{1}{L_k}+\frac{1}{L_{k+1}}\right)M_k-\frac{M_{k+1}}{L_{k+1}}+\frac{N_k}{L_k}Y_{k+1}+\left(V_k+\frac{\varepsilon_k V_k}{L_k}-\frac{N_k}{L_k}-\frac{N_{k-1}}{L_{k-1}}\right)Y_k-\left(\frac{q_{k+1}V_{k+1}}{L_{k+1}}-\frac{N_{k+1}}{L_{k+1}}\right)Y_{k+1} \tag{8-103}$$

$$\left.\begin{aligned}
a_k&=\frac{6}{\psi_k^2}\left(\frac{\psi_k}{\sin\psi_k}-1\right)\frac{L_k}{EJ_k}\\
b_k&=\frac{6}{\psi_k^2}(1-\psi_k\cot\psi_k)\frac{L_k}{EJ_k}\\
c_k&=\frac{24}{\psi_k^3}\left(\tan\frac{\psi_k}{2}-\frac{\psi_k}{2}\right)\frac{L_k}{EJ_k}\\
E_T&=\frac{6}{\psi_k^2}\left(\frac{\sin\psi_b}{\sin\psi_k}-\frac{6}{L_k}\right)\frac{L_k^2}{EJ_k}\\
\psi_k&=L_k\sqrt{\frac{N_k}{EJ_k}}\\
\psi_b&=b\sqrt{\frac{N_k}{EJ_k}}\\
\varepsilon_k&=e_k\tan\beta_k,\mathrm{m}\\
V_k&=\frac{P_k}{Y_k}
\end{aligned}\right\} \tag{8-104}$$

式中 e_k ——支座 k 上拉线偏心距（见图 8-90），m；

β_k ——第 k 层拉线的对地夹角，（°）；

P_k ——作用在支座 k 上的横向节点荷载，作为近似值可用三力矩方程求解，当拉线自身的风荷载较大时还应计入拉线风荷载，N。

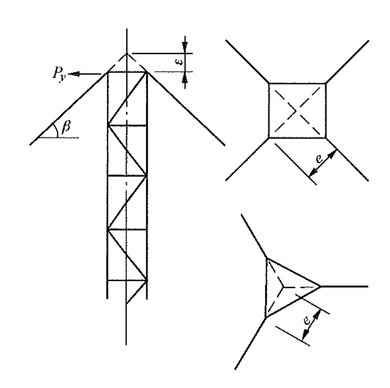


图 8-90　拉线节点的偏心距

在计算时可先假定各拉线点均为刚性支座，用三力矩方程求出支座横向节点荷载 P_k，带入拉线方程求解拉线受力及拉线点位移 Y_k、柱子压力 N_k（计入自重力）。即按式（8-104）计算各项系数后，带入式（8-102）和式（8-103），建立各支座的力矩方程和剪力方程，而后联立求解。

对于格构式主柱，必须考虑在横向力作用下腹杆变形的影响。考虑的方法就是将杆身截面的惯性矩 J，乘以折减系数 ζ，按式（8-105）计算。

$$\zeta=\frac{\lambda_x}{\lambda_{hx}}\text{或}\zeta=\frac{\lambda_y}{\lambda_{hy}} \tag{8-105}$$

式中 λ_x、λ_y ——柱（杆）身对 X 轴或 Y 轴的长细比；

λ_{hx}、λ_{hy} ——柱（杆）身对 X 轴或 Y 轴的折算长细比。

第六节　钢筋混凝土杆

一、钢筋混凝土杆内力及变形计算

我国 110kV 及以下的输电线路上普遍采用锥度为 1:75，梢径为 190～230mm 自立式环形断面普通钢筋混凝土和预应力钢筋混凝土拔梢单杆。其典型尺寸见图 8-1～图 8-5。

这种杆型一般用于导线在 150mm² 及以下的钢芯铝绞线，导线覆冰厚度不大于 10mm 的平地或丘陵地带。它的主要特点是占地面积小，运行维护方便，施工简单。但是，主杆埋置深度较深（2.5～3.0m），而且往往需设置卡盘来满足电杆倾覆稳定的要求。在东北、华北、西北地区，上卡盘在冻结深度之内，当有地下水时由于冻胀会使上卡盘与主杆上抬，影响电杆的稳定。因此，有地下水并有冻胀情况时，不宜使用自立式拔梢单杆。

自立式拔梢单杆的头部布置如图 8-91 所示，其中以改进后的上字型为常用的杆型。

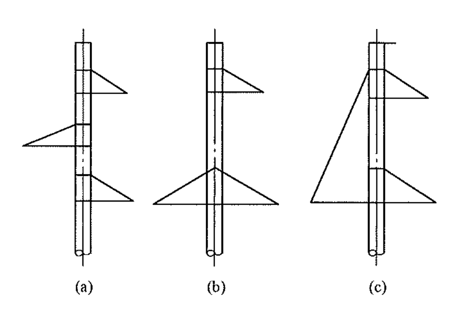


图 8-91　单杆头部布置型式

（a）克里姆型；（b）上字型；（c）改进后的上字型

自立式拔梢单杆的杆段选择，主要根据设计荷载及加工厂的钢模规格去选用。GB/T 4623—2014 中之杆段系列有多种不同直径与长度，使用时可结合加工厂的具体情况来选用。

上述 GB/T 4623—2014 中的杆段系列图见图 8-92。

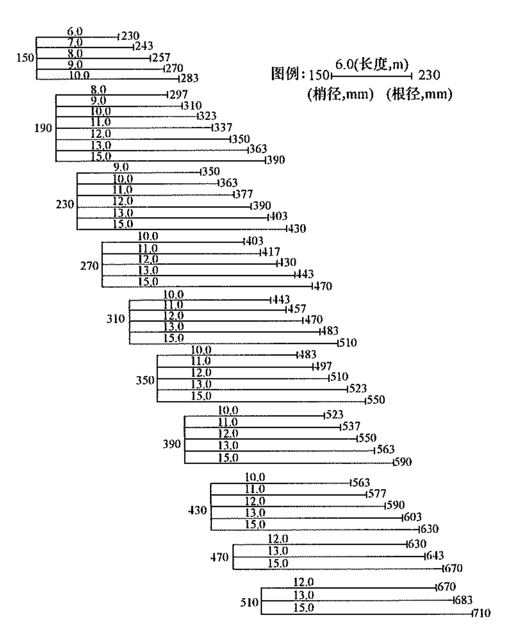


图 8-92 锥形杆杆段系列图（锥度 1:75）

（一）正常情况内力计算

正常最大风速情况的计算简图见图 8-93 中（a）。图中的 W_1、W_0 为电杆两端风压，在计算中取平均风压 W_{av}，按式（8-106）计算。

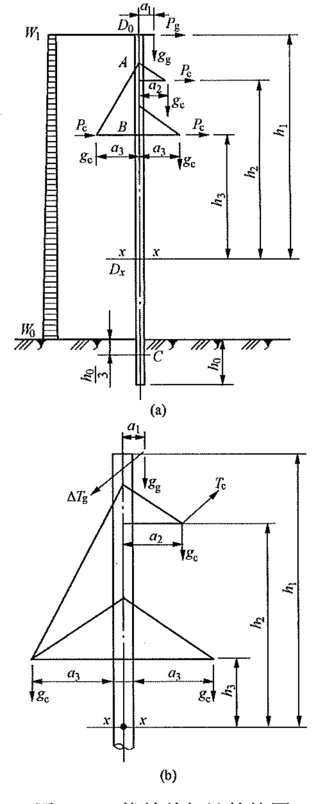


图 8-93 拔梢单杆计算简图

（a）正常情况计算简图；（b）事故情况计算简图

杆身风压为

$$W_{av} = \mu_s \mu_z A_s \frac{v^2}{1631} \tag{8-106}$$

式中 μ_s ——风载体型系数，对环形截面取 $\mu_s = 0.7$；

A_s ——杆身投影面积，对拔梢单杆其面积可取平均直径计算，m²；

v ——设计风速，m/s；

μ_z ——风压高度变化系数。

杆身任意截面 x-x 处的弯矩和切力标准值为

$$M_x = \left(P_g h_1 + P_c h_2 + 2P_c h_3 + W_{av} h_1 \bar{h}\right) \times (1+m) + \left(g_g a_1 + g_c a_2\right) \tag{8-107}$$

$$Q_x = P_g + 3P_c + W_{av} h_1 \tag{8-108}$$

$$\bar{h} = \frac{h_1}{3} \times \frac{2D_0 + D_x}{D_0 + D_x} \tag{8-109}$$

式中 $\bar{h}$ ——x-x 截面至杆身风压合力作用点的高度，m；

m ——由挠度产生的附加弯矩系数，取 0.15。

其他符号含义如图 8-93 所示。

杆身弯矩，一般应计算 A 点、B 点、根部固定处 C 点，主杆分段处以及杆内抽筋处的弯矩；相应截面的剪力，用以计算钢箍或螺旋钢筋。根据多年的工程实践，螺旋筋一般可按构造配置。主杆根据计算弯矩按纯弯构件计算配筋，并沿圆截面均匀布置。

（二）事故情况内力计算

单杆事故断导线情况，可以考虑断线时主杆杆顶挠曲后，由于地线张力变化产生的地线支持力ΔT_b。计算简图见图 8-93 中（b）。

事故断线后，在杆身产生弯矩和扭矩，任意截面处的弯矩和扭矩按下述计算。

1. 断上导线情况

弯矩标准值

$$M_x = K_0 T_c h_2 - \Delta T_g h_1 \tag{8-110}$$

扭矩标准值

$$M_k = T_c a_2 \tag{8-111}$$

2. 断下导线情况

弯矩标准值

$$M_x = K_0 T_c h_3 - \Delta T_g h_1 \tag{8-112}$$

扭矩标准值

$$M_k = T_c a_3 \tag{8-113}$$

式中 T_c ——断导线后残存张力，kN；

K_0 ——断导线冲击系数；

ΔT_g ——地线支持力，kN。

地线支持力的大小，与一个耐张段内的档距多少有关。导线在耐张段间不同档距内断线时，引起的地线支持力也不同。如果在靠近耐张杆的一档内断线时，

将产生最小地线支持力；而在耐张段中央档距内断线时，将产生最大地线支持力。最大地线支持力对电杆上部会产生较大的弯矩，而地线支持力最小时对电杆根部嵌固点处会产生较大的弯矩。计算中必须考虑这两种不利情况的组合。因此，地线支持力应根据工程的具体情况计算后取值。

对不架设地线的拔梢单杆，在断导线时，其受力状态类似于一悬臂梁，对主杆不仅产生弯矩，同时产生扭矩和切力。

（三）安装情况内力计算

安装情况应考虑导线的双倍起吊及附加荷载。安装情况产生的弯矩对主杆一般不起控制作用，主要应视采用横担之结构型式，对横担及吊杆进行强度与稳定计算。

（四）挠度计算

挠度计算的基本假定是将整个电杆视为一个一端嵌固的悬臂梁，其嵌固点近似地取电杆埋深距地面三分之一处。计算目的主要用以核算运行情况下的倾斜值，同时计算由于电杆变形而对主杆产生的附加弯矩。电杆的挠度一般由水平力作用下的杆顶挠度、水平力引起杆身角变位、偏心弯矩引起杆身角度位三部分组成，如图 8-94 所示。

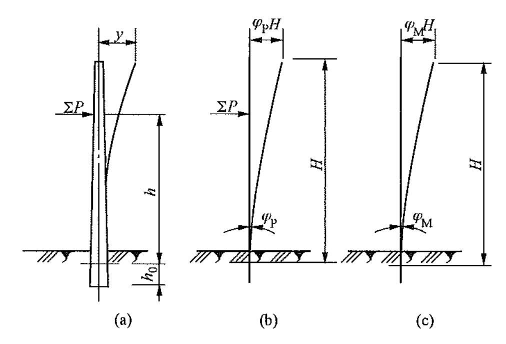


图 8-94 挠度计算简图
（a）水平力作用下的杆顶挠度；
（b）水平力引起杆身角变位；
（c）偏心弯矩引起杆身角变位

1. 在水平力作用下的杆顶挠度

假定电杆的根部完全固定时，由于水平力作用产生的杆顶挠度为

$$y=\frac{K\sum PH^3}{3B} \tag{8-114}$$

式中 $\sum P$ ——水平力合力，kN；

K ——与水平力合力位置有关的系数，按图 8-95 查出；

B ——杆根固定点处电杆刚度，详见 DL/T 5154—2012《架空输电线路杆塔结构设计技术规定》，对直线杆和 0° 耐张杆，风荷载可考虑为短期荷载，刚度可用短期刚度；对转角杆的电线张力可考虑为长期荷载，且其起主导作用，刚度可用长期刚度。

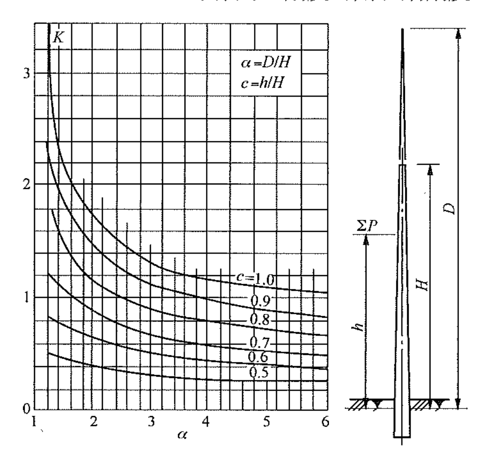


图 8-95 水平力合力位置系数图

2. 在水平力作用下，由于土壤压缩变形引起的杆身角变位

$$\varphi_P=\frac{C_1\sum P}{E_0h_0^3}\times(6\gamma+3)\times\varepsilon \tag{8-115}$$

在垂直荷重产生之偏心弯矩作用下，杆身角变位为

$$\varphi_M=\frac{C_2M}{E_0h_0^3}\varepsilon \tag{8-116}$$

式中 C_1 ——系数，无卡盘或仅有上卡盘时取 0.75，有上、下卡盘时取 0.6；

C_2 ——系数，无卡盘或仅有上卡盘时取 4.5，有上、下卡盘时取 3.6；

M ——垂直荷载产生的偏心弯矩，kN·m；

E_0 ——土壤变形系数，见表 8-41；

γ ——合力作用点高度与埋深之比，$\gamma=h/h_0$；

ε ——系数，按表 8-42 查出；

$\sum P$ ——水平力合力，kN。

表 8-41 土壤变形系数 E_0

土壤种类		变形系数 E_0（kN/m²）
粗粒类	1. 砾石	5400～6500
	2. 碎石	6500～29000
	3. 卵石	4200～14000

续表

土壤种类		变形系数 E_0（kN/m²）	
砂土类	1. 粗砂和砂砾 2. 中砂	密实的 4800 4200	中等密实 36000 31000
	3. 细砂：干的和稍湿的 很湿和饱和的	36000 31000	25000 19000
	4. 粉砂：干的和稍湿的 很湿的 饱和的	21000 17500 14000	17500 14000 9000
黏土类	1. 亚砂土：孔隙比ε=0.5 ε=0.7	坚硬的 16000 12500	塑性的 9000 5000
	2. 亚黏土：干的 稍湿的 中等湿度 坚硬可塑 可塑 流动	坚硬的 39000 30000 20000	塑性的 16000 10000 4000
	3. 黏土：干的 稍湿的 中等湿度 坚硬可塑 可塑 流动	坚硬的 59000 40000 30000	塑性的 16000 10000 4000

表 8-42　　系　数　ε

$\frac{b}{h_0}$	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
ε	7.0	6.2	5.0	4.2	3.8	3.3	3.0	2.8	2.7	2.5	2.4

注　b 为杆根埋入部分的平均宽度或直径。
h_0 为电杆埋置深度。

3. 杆顶总挠度

杆顶总挠度为

$$\delta = y + (\varphi_p + \varphi_M) \times H \quad (8\text{-}117)$$

拔梢单杆的总挠度，主要是水平力作用下的 y。根据以往大量计算结果以及工程实践的经验，由于杆顶挠度对主杆产生的附加弯矩值相当于在水平力作用下产生弯矩值的 15%以内，故一般不必计算由于杆顶挠度对主杆产生的附加弯矩。在计算主杆弯矩时，将水平荷载产生的弯矩值考虑 0.15 的增大系数，即可满足工程设计的要求。由于垂直荷载产生的 φ_M 值很小，可忽略不计。

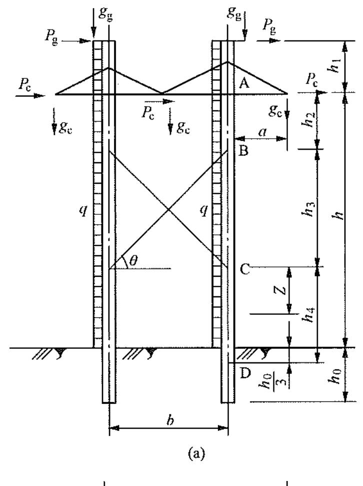
钢筋混凝土及预应力混凝土环形截面电杆构件计算及构造要求，可参见 DL/T 5145—2012《架空输电线路杆塔结构设计技术规定》和 GB 50135—2006《高耸结构设计规范》。

二、门型双杆内力计算

自立式门型双杆有两种结构型式：一种有叉梁；另一种无叉梁。

无叉梁双杆主要用于 35kV 送电线路。有叉梁双杆可以承受较大的外荷载，还可减少主杆的计算弯矩，增强电杆的整体刚度。这种有叉梁的门型杆在我国 110～330kV 送电线路工程中得到了较多的应用。其外形尺寸见图 8-2。

有叉梁门型双杆叉梁的固定位置，在满足电气间隙要求前提下，最理想的位置是使上部固定点与下部固定点处弯矩相等，见图 8-96 中之 M_B=M_C。



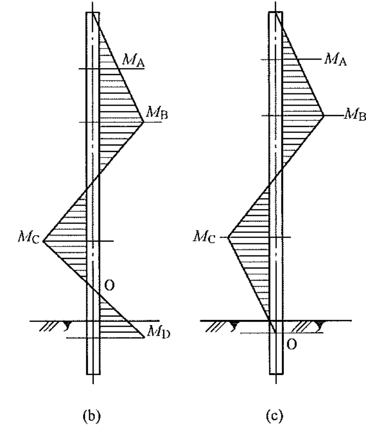


图 8-96　电杆弯矩计算图形

门型双杆的横担，多采用角钢组成的平面横担。

(一) 正常情况内力计算

对无叉梁的门型双杆，在正常和事故情况下的内力计算，可按表 8-43 的分配值，直接计算各点力矩，主杆按受弯构件计算。

有叉梁的门型双杆，其结构体系是超静定结构。由于土壤特性叉梁与电杆连接点刚度等可变因素对准确计算影响较大，计算时有一定困难，工程设计中在求出叉梁下部固定点与主杆嵌固点间之零力矩点后，按以下两种近似方法计算主杆内力。

1. 电杆埋深内力计算

当电杆埋置较深（h_0=2.5m 左右），基础抵抗倾覆弯矩能满足稳定要求时，假定根部按固定计算。其弯矩图形见图 8-96（b）。

主杆弯矩计算

$$M_A = P_g h_1 + \frac{1}{2} q h_1^2 \tag{8-118}$$

$$M_B = 0.55 \times \left[2P_g(h_1+h_2) + 3P_c h_2 + \frac{1}{2} q (h_1+h_2)^2 \right] \tag{8-119}$$

$$M_C = 0,55 \sum P K_0 Z \tag{8-120}$$

$$M_D = 0.55 \sum P K_0 (h_4 - Z) \tag{8-121}$$

式中　$\sum P$ ——零力矩点以上所有水平荷载及杆身风压之和，kN；

K_0 ——零力矩点的偏离系数，取 K_0=1.1～1.2；

Z ——零力矩点位置，对等径杆取 $Z=\frac{h_4}{2}$，对拔梢杆按 C、D 两点刚度分配，$Z = h_4 \times \frac{W_C}{W_C + W_D}$，$W_C$、$W_D$ 分别为 C、D 两点主杆的断面系数，m³。

表 8-43　　门型双杆内力计算分配

杆型特点	杆型简图	正常情况分配	事故情况分配
（1）无地线无叉梁		A 柱：$0.5\sum P$ B 柱：$0.5\sum P$	A 柱：$1.0\,T_c$ B 柱：0
（2）无地线有叉梁		A 柱：$0.55\sum P$ B 柱：$0.55\sum P$	A 柱：$1.0\,T_c$ B 柱：0
（3）有地线无叉梁		A 柱：$0.5\sum P$ B 柱：$0.5\sum P$	A 柱：$0.85\,T_c\frac{a+b}{b}$ B 柱：$0.85\,T_c\frac{a}{b}$
（4）有地线有叉梁		A 柱：$0.55\sum P$ B 柱：$0.55\sum P$	A 柱：$0.85\,T_c\frac{a+b}{b}$ B 柱：$0.85\,T_c\frac{a}{b}$

其他符号含义如图 8-96 所示。

主杆受压力或上拔力计算

$$R_{\mathrm{V}}=\pm\frac{\sum M_{\mathrm{D}}}{b}-\frac{\sum G}{2} \qquad (8\text{-}122)$$

当计算主杆受压力时取 $\sum M_{\mathrm{D}}$ 为负、上拔力时取为正。

叉梁轴力计算：

$$N=\pm 0.55\frac{\sum M_0}{h_3\cos\theta} \qquad (8\text{-}123)$$

式中 $\sum M_0$ ——所有水平力对零力矩点的力矩和，kN·m；

$\sum M_{\mathrm{D}}$ ——所有水平力对杆根固定点的力矩和，kN·m；

$\sum G$ ——所有垂直荷载及电杆自重力、横担等部件自重力的和，kN。

2. 电杆浅埋内力计算

当电杆埋置较浅时（h=1.5m 左右），假定根部按铰接计算，其计算弯矩图形见图 8-96（c）。计算时，假定根部铰接点在埋深 h_0=1.0m 处。

主杆弯矩计算

$$M_{\mathrm{C}}=0.55\sum Ph_4 \qquad (8\text{-}124)$$

叉梁轴向力计算

$$N=\pm 0.55\frac{\sum M_{\mathrm{D}}}{h_3\cos\theta} \qquad (8\text{-}125)$$

其他各点内力计算以及公式符号含义同前。

（二）事故情况内力计算

无地线的门型双杆，断导线时的内力计算可按表 8-43 的分配数值，直接计算电杆各点力矩。按受弯构件选择截面配筋。

有地线的双杆，断导线时的内力计算，可以考虑地线的支持力。地线支持力的计算仍应根据工程的具体情况计算取值。考虑地线支持力后，主杆弯矩的计算：

导线横担处的弯矩为

$$M_{\mathrm{A}}=\Delta T_{\max}h_1 \qquad (8\text{-}126)$$

主杆在根部固定点的弯矩为

$$M_{\mathrm{D}}=0.85T_{\mathrm{c}}\frac{a+b}{b}K_0h-\Delta T_{\min}H \qquad (8\text{-}127)$$

叉梁内力为

$$N=\pm 0.55\frac{\sum M_0}{h_3\cos\theta} \qquad (8\text{-}128)$$

式中 $\Delta T_{\max}$ ——地线支持力的最大值，kN；

$\Delta T_{\min}$ ——地线支持力的最小值，kN。

其他符号含义同前。

事故情况内力计算简图见图 8-97。

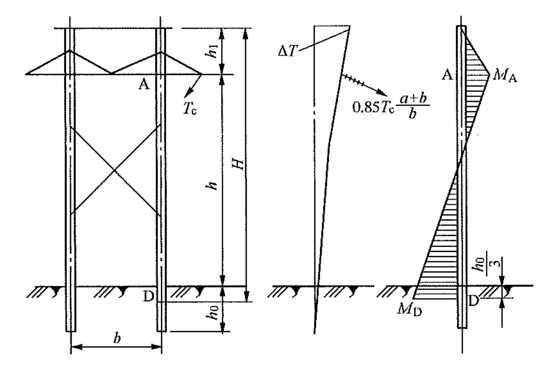


图 8-97 事故情况内力计算简图

三、A 型双杆内力计算

无拉线的 A 字型双杆，一般由全长 18.0m 或全长 21.0m 的拔梢杆组成，18.0m 杆段可分为 2×9.0m 或 3×6.0m，21.0m 杆段由 2×6.0m、1×9.0m 组成。适用于导线垂直排列，线路跨越障碍物或荷载较大处的 35～110kV 输电线路。这种杆型的结构比有叉梁双杆的简单，整体立杆时稳定性较好。横担结构一般采用固定横担。

A 字型双杆在横向荷载作用下的内力，按超静定结构计算比较复杂，也缺少工程实践经验。目前的计算方法仍根据以往的试验研究，在工程设计中按下述原则计算：

当电杆在横向荷载作用下，按 A 柱承受全部横向荷载的 0.55 倍；B 柱承受全部横向荷载的 0.45 倍计算。计算简图见图 8-98。

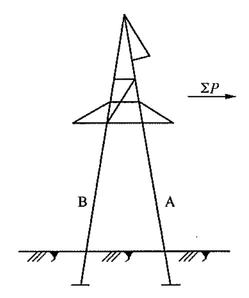


图 8-98 A 字型双杆计算简图

电杆在事故情况下，假定两杆共同受力，按表 8-44 的分配系数计算。

表 8-44 A 字型双杆内力计算分配

断上导线情况	断下导线情况
T_{c}，R_{B}，R_{A}　$R_{\mathrm{A}}=0.55T_{\mathrm{c}}$　$R_{\mathrm{B}}=0.45T_{\mathrm{c}}$	T_{c}，R_{B}，R_{A}　$R_{\mathrm{A}}=0.6T_{\mathrm{c}}$　$R_{\mathrm{B}}=0.4T_{\mathrm{c}}$

注 表中 T_{c} 为断线张力，对于直线杆必须乘以冲击系数 K。

四、高性能混凝土杆

随着科学技术的发展，工程材料质量及施工技术水平都在逐渐提高，随之而来的是人们对高强度与高性能混凝土综合指标的提升需求。普通混凝土已很难满足许多特殊结构对材料功能的要求，因而具有高强度、高性能等突出特点的活性粉末混凝土成为近年来混凝土材料研究的一个热点。

超高性能混凝土（简称 UHPC）是以水泥和矿物掺合料等活性粉末材料、细骨料、外加剂、高强度微细钢纤维或有机合成纤维、水等原料生产的活性粉末混凝土。与传统混凝土相比，UHPC 具有优异的力学性能，包括极高的抗压强度，优良的抗冲击、抗疲劳性能，另外，具有极佳的耐久性能。近十年来，欧美、日本等发达国家及我国在海洋、军工、桥梁、高层建筑、高铁、风电等领域已有许多成功的应用案例。2015 年 11 月开始实施的 GB/T 31387—2015《活性粉末混凝土》，对配合比做出了较为明确的规定；2017 年 8 月 1 日开始实施的 T/CEC 143—2017《超高性能混凝土电杆》，规范了输电领域超高性能混凝土电杆设计、加工、制造等方面的内容，进一步推动了超高性能混凝土应用和研究。UHPC120 与 C60 混凝土性能对照表如表 8-45 所示。

表 8-45　UHPC120 与 C60 混凝土性能对照表

性能＼材料	UHPC120	C60
抗压强度（MPa）	≥120	67～72
弹性模量（GPa）	≥40	36

UPHC 电杆体壁厚均匀，细腻致密；有效地减少了杆体纵向裂缝的发生，大大提高了构件的承载力和变形能力，使混凝土脆性破坏变为延性破坏。UHPC 电杆良好的密实度，使其具有极低的渗透性、很好的抗腐蚀性和抗高寒地区冻融循环破坏能力，从而提高了 UHPC 电杆的耐久性。在盐碱河滩、沿海、内陆盐渍土等腐蚀严重地区使用 UHPC 电杆，无须特殊防腐即可满足防腐和耐久性要求，可有效降低运维成本。

UHPC 电杆在保留了传统混凝土电杆价格优势的前提下，受力性能和耐久性能显著提高，可替代部分钢管杆，在风速较大的沿海和戈壁地区有着良好的应用前景，值得在工程中推广和使用。

第七节　钢管杆内力分析及变形计算

钢管杆的主要特点是不打拉线，占地面积较小；横担布置比较灵活。其主杆坡度、壁厚可根据结构受力、变形情况进行优化设计；其杆段长度可直接根据加工厂的设备情况确定。因此其头部两侧布置成对称（或非对称）型横担，或根据具体情况，横担造型可适当进行工艺性美化。但由于钢管杆比铁塔、钢筋混凝土杆的造价高，使用前应综合分析，做好全面的技术经济比较。

一、钢管杆的型式

这里主要介绍拔梢型自立式钢管杆。

（1）按导线排列方式分类。单回路钢管杆导线为三角形排列，主要为上字型。

双回路或多回路钢管杆，导线多为左右对称布置，垂直排列，有鼓型、正伞型和倒伞型等。

（2）按用途分类。无论单回路、双回路或多回路的钢管杆，按其用途可分为悬垂杆、耐张杆、终端杆、分歧杆、换位杆等。

（3）钢管杆的横担型式。由角钢组成的平面桁架横担，称为片横担；由钢板焊成的变截面工字型或箱型横担，称为变截面横担。为了节省材料及充分利用电气间隙，横担可设计成弧线或折线型，从顶部至根部为变截面型式，增加了杆型的整体美观性。

二、钢管杆使用材料的原则及要求

（1）钢管杆的钢材一般采用 Q235、Q345，有条件时也可采用 Q390、Q420、Q460 等高强钢。钢材的强度设计值及物理特性指标应符合 GB 50017、GB/T 700 和 GB/T 1591。

（2）钢管杆的钢材均应满足不低于 B 级钢的质量要求。当结构工作温度不高于–40℃时，Q235、Q345、Q390 焊接构件和 Q420 钢材质量等级应满足不低于 C 级钢的质量要求，Q460 钢材质量等级不低于 D 级钢的质量要求，螺栓孔宜采用钻孔工艺。

（3）手工焊焊接用焊条应符合 GB/T 5117 和 GB/T 5118 的规定。

（4）自动焊和半自动焊应采用与主体金属强度相适应的焊丝和焊剂，应保证其熔敷金属抗拉强度不低于相应手工焊焊条的数值。焊丝应符合 GB 50661 规定的要求。

（5）螺栓和螺母的材质及其机械特性应分别符合 GB/T 3098.1 和 GB/T 3098.2 的规定。

三、钢管杆计算

钢管杆的强度、稳定和连接强度应按承载力极限状态的要求，采用荷载的设计值和材料强度的设计值进行计算。

钢管杆的导地线风荷载见第五章第一节。

（一）杆身风荷载的标准值

（1）杆身风荷载的标准值按下式计算，即

$$W_S = W_0 \cdot \mu_z \cdot \mu_S \cdot B_2 \cdot \beta_z \cdot D \quad (8\text{-}129)$$

式中 W_S ——作用在杆身单位长度上的风荷载标准值，kN/m；

μ_S ——风载体型系数，按表 8-46 取用；

B_2 ——杆塔构件覆冰风荷载增大系数，可根据当地覆冰类型及覆冰厚度适当考虑；

β_z ——杆塔风荷载调整系数。按表 8-47 取用；

D ——杆身直径的平均值，m。

表 8-46 风载体型系数 μ_s

断面形状	风载体型系数 μ_s
环形及十六边形以上	0.9
十二边形	1.1
八边形及六边形	1.2
四边形	1.6

注 已包括杆身附件的影响。

表 8-47 杆身风荷载调整系数 β_z

杆全高（m）	20	30	40	50	60
66kV 及以下	1.0	1.2	1.2	1.2	1.5
110～500kV	1.0	1.25	1.35	1.5	1.6

注 中间值按插入法计算。

（2）钢管杆的计算应考虑挠度的二次效应（也即 P－Δ 效应）影响，可采用非线性有限元理论模型程序进行精确分析。当手工计算时，可按表 8-50 所列的简化公式计算。

（3）外壁的坡度小于 2%的圆锥形构件和圆筒形钢管构件，应计及风激横向振动的效应，必要时应采取适当的防护措施。

风激横向振动应根据雷诺数 Re 的不同情况进行验算：

1）可按下列公式计算结构或构件的雷诺数 Re、临界风速 v_{cr}、结构顶部风速 v_H：

$$Re = 69\,000vd \quad (8\text{-}130)$$

$$v_{cr,j} = \frac{d}{St \cdot T_j} = \frac{5d}{T_j} \quad (8\text{-}131)$$

$$v_H = 40\sqrt{\mu_H \omega_0} \quad (8\text{-}132)$$

式中 $v_{cr,j}$ ——第 j 振型临界风速，m/s；

v ——计算雷诺数时所取风速，m/s，可取 $v = v_{cr,j}$；

d ——圆筒形结构的外径，m，有锥度时可取 2/3 高度处的外径；

St ——斯脱罗哈数，对圆形截面结构或构件取 0.2；

T_j ——结构或构件的第 j 振型的自振周期，s；

v_H ——结构顶部的风速，m/s；

μ_H ——高度 H 处风压高度变化系数。

2）圆形截面结构或构件的横风向共振响应分析：

a）当雷诺数 $Re < 3\times10^5$ 且 $v_H > v_{cr,1}$ 时，可能发生第 1 振型微风共振（亚临界范围的共振），此时应在构造上采取防振措施或控制结构的临界风速 $v_{cr,1}$ 不小于 15m/s，以降低微风共振的发生率。

b）当雷诺数 $Re \geqslant 3.5\times10^6$ 且 $1.2v_H > v_{cr,j}$ 时，可能发生横风向共振（跨临界范围的共振），此时应验算共振响应。横向共振引起的等效静风荷载 ω_{Lij}（kN/m²）应按下式计算，即

$$\omega_{Lij} = \frac{\mu_L v_{cr,j}^2 \phi_{ji} \lambda_j}{3200\zeta_j} \quad (8\text{-}133)$$

$$H_1 = H \times \left(\frac{v_{cr,j}}{1.2v_{H,\alpha}}\right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (8\text{-}134)$$

式中 ϕ_{ji} —— j 振型在 i 点的相对位移。

$v_{cr,j}$ —— j 振型的共振临界风速（m/s），按式（8-131）计算。

$v_{H,\alpha}$ ——粗糙度指数为 α 时的结构顶点的风速。

ζ_j ——结构第 j 振型阻尼比。对于第 1 振型，无维护的纯钢结构取 0.01，有维护的钢结构取 0.02，混凝土结构取 0.05。对于高振型，可参考类似资料，如无试验资料，也可取与第 1 振型相同的值。

μ_L ——横向力系数，取 0.25。

λ_j ——共振区域系数，由表 8-48 确定。

H_1 ——共振临界风速起始高度。

表 8-48 λ_j 计算用表

振型序号	H_1/H										
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
1	1.56	1.55	1.54	1.49	1.42	1.31	1.15	0.94	0.68	0.37	0
2	0.83	0.82	0.76	0.60	0.37	0.09	−0.16	−0.33	−0.38	−0.27	0
3	0.52	0.48	0.32	0.06	−0.19	−0.30	−0.21	0.00	0.20	0.23	0
4	0.30	0.33	0.02	−0.20	−0.23	0.03	0.16	0.15	−0.05	−0.18	0

注 校核横风向共振时考虑的振型序号不大于 4，对一般悬臂结构可只考虑第 1 或第 2 振型。

c）当雷诺数为 $3\times10^5 \leqslant Re < 3.5\times10^6$ 时，则发生

超临界范围的共振，可不做处理。

（4）对于非圆截面，基本公式（8-130）～式（8-134）相同，但系数不同，宜通过风洞试验取得确切系数，也可按有关资料确定，如无合适值，可选用下列数值：

1）斯脱罗哈数 St，取 0.15。

2）横风向力系数 μ_L，方形截面（可应用到矩形截面高深比为 1～2）取 0.60。

3）d 改变为 B，B 为截面迎风面最大尺度。

（5）考虑横风向风振时，风荷载的总效应 S（内力、变形等）可由横风向风振的效应 S_L 和顺风向风荷载的效应 S_A 按式（8-135）组合而成，此时顺风向风荷载取与横风向临界风速计算响应的风荷载值。

$$S=\sqrt{S_A^2+S_L^2} \tag{8-135}$$

（二）钢管杆的断面特性

常用的钢管断面特性可采用表 8-49 中的近似计算公式。

表 8-49　　钢管断面特性

断面型式	断面特性	
环形（y, x, t, D）	$A_g=3.14Dt$ $I_x=I_y=0.393D^3t$ $C_x=0.5(D+t)\cos\alpha$ $C_y=0.5(D+t)\sin\alpha$	$r=0.354D$ Max $Q/I_t=\dfrac{0.637}{Dt}$ Max $C/J=\dfrac{0.637\times(D+t)}{D^3t}$
十六边形（y, x, W, t, D, α=11.25°）	$A_g=3.19Dt$ $I_x=I_y=0.403D^3t$ $C_x=0.510(D+t)\cos\alpha$ $C_y=0.510(D+t)\sin\alpha$ α=11.25，33.75，56.25，78.75°	$r=0.356D$ Max $Q/I_t=\dfrac{0.634}{Dt}$ Max $C/J=\dfrac{0.628\times(D+t)}{D^3t}$ $W=0.199(D-t-2BR)$
十二边形（y, x, W, t, D, α=15°）	$A_g=3.22D\cdot t$ $I_x=I_y=0.411D^3\cdot t$ $C_x=0.518\times(D+t)\times\cos\alpha$ $C_y=0.518\times(D+t)\times\sin\alpha$ α=15，45，75°	$r=0.358D$ Max $Q/I_t=\dfrac{0.631}{Dt}$ Max $C/J=\dfrac{0.622\times(D+t)}{D^3t}$ $W=0.268(D-t-2BR)$
八边形（y, x, W, t, D, α=22.5°）	$A_g=3.32Dt$ $I_x=I_y=0.438D^3t$ $C_x=0.541\times(D+t)\times\cos\alpha$ $C_y=0.541\times(D+t)\times\sin\alpha$ α=22.5，67.5°	$r=0.364D$ Max $Q/I_t=\dfrac{0.618}{Dt}$ Max $C/J=\dfrac{0.603\times(D+t)}{D^3t}$ $W=0.414\times(D-t-2BR)$
六边形（y, x, W, t, D, α=30°）	$A_g=3.46Dt$ $I_x=I_y=0.481D^3t$ $C_x=0.577\times(D+t)\times\cos\alpha$ $C_y=0.577\times(D+t)\times\sin\alpha$ α=30，90°	$r=0.373D$ Max $Q/I_t=\dfrac{0.606}{Dt}$ Max $C/J=\dfrac{0.577\times(D+t)}{D^3t}$ $W=0.577\times(D-t-2BR)$

续表

断面型式	断 面 特 性	
四边形 α=45°	A_g=4.00Dt I_x=I_y=0.666D^3t C_x=0.707×（D+t）×cosα C_y=0.707×（D+t）×sinα α=45°	r=0.408D Max $Q/I_t=\dfrac{0.563}{Dt}$ Max $C/J=\dfrac{0.500\times(D+t)}{D^3t}$ W=（D–t–2BR）

注　表中 α 为 X 轴和多边形顶角点之间的夹角，（°）；

D 为平均直径，D=D_0–t，mm；

D_0 为圆的外直径或多边形两对应边，外边至外边的距离，mm；

t 为厚度，mm；

A_g 为毛截面面积，mm²；

I_x 为绕 X 轴的毛截面惯性矩，mm⁴；

I_y 为绕 Y 轴的毛截面惯性矩，mm⁴；

C_x 为计算点在 X 轴的投影长度，mm；

C_y 为计算点在 Y 轴的投影长度，mm；

r 为回转半径 mm；

$\dfrac{Q}{I_t}$ 为确定最大弯曲剪应力的参数，1/mm²；

$\dfrac{C}{J}$ 为确定最大扭转剪应力的参数，1/mm³；

J 为极惯性矩，mm⁴；

W 为多边形一条边的平直宽度，mm，图 8-99；

BR 为有效弯曲半径，mm，图 8-99；

如果弯曲半径小于 4t，BR=实际弯曲半径；

如果弯曲半径大于 4t，BR=4t。

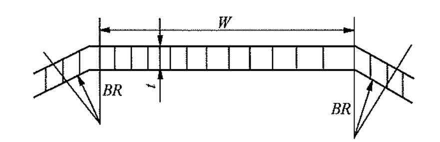


图 8-99　多边形断面的展开宽度和弯曲半径

（三）钢管杆的构件计算

1. 构件的轴心受拉强度计算

$$\frac{N_1}{A_n}\leqslant f \tag{8-136}$$

式中　N_1——轴心拉力，N；

A_n——净截面面积，mm²；

f——钢材的强度设计值，N/mm²。

2. 多边形构件的压弯局部稳定计算

（1）多边形构件压弯局部稳定的强度设计值。

1）当 W/t 符合下列要求时，其强度设计值取钢材的强度设计值。

四方形，六、八边形

$$当\frac{W}{t}\leqslant\frac{660}{\sqrt{f}}时，\ f_a=f \tag{8-137}$$

十二边形

$$当\frac{W}{t}\leqslant\frac{610}{\sqrt{f}}时，\ f_a=f \tag{8-138}$$

十六边形

$$当\frac{W}{t}\leqslant\frac{545}{\sqrt{f}}时，\ f_a=f \tag{8-139}$$

式中　f_a——多边形构件压弯局部稳定的强度设计值，N/mm²。

2）当 W/t 不符合式（8-137）～式（8-139）要求时，其强度设计值按下列公式计算：

四方形，六、八边形

当 $660\leqslant\sqrt{f}\dfrac{W}{t}\leqslant925$ 时，

$$f_a=1.42f\left(1.0-0.000448\sqrt{f}\frac{W}{t}\right) \tag{8-140}$$

十二边形

当 $610\leqslant\sqrt{f}\dfrac{W}{t}\leqslant925$ 时，

$$f_a=1.45f\left(1.0-0.000507\sqrt{f}\frac{W}{t}\right) \tag{8-141}$$

十六边形

当 $545 \leqslant \sqrt{f}\dfrac{W}{t} \leqslant 925$ 时，

$$f_a = 1.42f\left(1.0 - 0.000539\sqrt{f}\frac{W}{t}\right) \quad (8\text{-}142)$$

（2）多边形构件的压弯局部稳定计算

$$\frac{N_2}{A_g} + \frac{M_X C_Y}{I_X} \leqslant f_a \quad (8\text{-}143)$$

$$\frac{N_2}{A_g} + \frac{M_Y C_X}{I_Y} \leqslant f_a \quad (8\text{-}144)$$

式中 N_2——轴心压力，N；

M_X——绕 X 轴截面弯矩，N·mm；

M_Y——绕 Y 轴截面弯矩，N·mm。

3. 环形构件压弯局部稳定计算

（1）环形构件受压和受弯局部稳定强度设计值

1）当 D_0/t 符合下列要求时，受压和受弯局部稳定强度设计值取钢材的强度设计值。

受压

$$当 \frac{D_0}{t} \leqslant \frac{24100}{f} 时，\ f_c = f \quad (8\text{-}145)$$

受弯

$$当 \frac{D_0}{t} \leqslant \frac{38060}{f} 时，\ f_b = f \quad (8\text{-}146)$$

式中 f_c——环形构件受压局部稳定强度设计值，N/mm^2；

f_b——环形构件受弯局部稳定强度设计值，N/mm^2。

2）当 D_0/t 不符合式（8-145）、式（8-146）要求时，其强度设计值按下列公式计算

受压

当 $\dfrac{24100}{f} \leqslant \dfrac{D_0}{t} \leqslant \dfrac{76130}{f}$ 时，

$$f_c = 0.75f + \frac{6025}{D_0/t} \quad (8\text{-}147)$$

受弯

当 $\dfrac{38060}{f} \leqslant \dfrac{D_0}{t} \leqslant \dfrac{76130}{f}$ 时，

$$f_b = 0.7f + \frac{11410}{D_0/t} \quad (8\text{-}148)$$

（2）环形构件压弯局部稳定计算

$$\frac{N_2}{A_g f_c} + \frac{MC}{If_b} \leqslant 1 \quad (8\text{-}149)$$

式中 C——从中和轴至计算点的距离，mm；

I——截面惯性矩，mm^4。

4. 多边形或环形构件的弯曲强度计算

$$\frac{MC}{I} \leqslant f_a \ （多边形） \quad (8\text{-}150)$$

或

$$\leqslant f_b \ （环形） \quad (8\text{-}151)$$

5. 多边形或环形构件的剪切强度计算

$$V\frac{Q}{I_t} + T\frac{C}{J} \leqslant 0.58f \quad (8\text{-}152)$$

式中 V——剪力，N；

T——扭矩，N·mm。

6. 多边形或环形构件的复合受力强度计算

$$\left(\frac{N_2}{A_g} + \frac{M_x C_y}{I_x} + \frac{M_y C_x}{I_y}\right)^2 + 3\left(V\frac{Q}{I_t} + T\frac{C}{J}\right)^2 \leqslant f_a^2$$

$$（多边形） \quad (8\text{-}153)$$

或

$$\leqslant f_b^2 \ （环形） \quad (8\text{-}154)$$

四、钢管杆的挠度计算

钢管杆在设计中除了应满足各种荷载组合的强度、稳定要求外，尚应进行挠度计算。钢管杆的挠度应按正常使用极限状态的要求，采用荷载的标准值和正常使用规定限值进行计算。

在荷载的长期效应组合（无冰、风速 5m/s 及年平均气温）作用下，钢管杆杆顶的最大挠度不应超过下列数值：

1. 直线型杆

直线杆不大于杆身高度的 5‰；

直线杆转角不大于杆身高度的 7‰。

2. 转角和终端杆

66kV 及以下电压等级挠度不大于杆身高度的 15‰；

110～220kV 电压等级挠度不大于杆身高度的 20‰。

注：杆身高度应从基础顶面算起。

设计时可根据挠度计算情况，调整杆身的截面尺寸，加大（或减小）直径、壁厚等，直到满足为止。对于转角杆为保证杆体架线后不向转角内侧倾斜，设计可采取杆体向转角外侧预偏的措施。

挠度可根据荷载类型，按表 8-50 所列公式进行计算，公式中有关系数查表 8-51，挠度计算中转角项如为负值，但计算总挠度时，应采用正号进行叠加。

表 8-50 钢管杆挠度计算用表

计算简图	计算公式	
	挠度	转角
F_H, A, B, L	$f_{AF_H}=\frac{F_H L^3}{EI_B}\times\alpha_1$	$\theta_{AF_H}=\frac{-F_H L^2}{EI_B}\times\beta_1$
C, F_H, A, B, d, L_1	$f_{CF_H}=\frac{F_H L_1^3}{EI_B}\times\left(\alpha_1+\frac{d}{L_1}\beta_1\right)$	$\theta_{CF_H}=\theta_{AF_H}$
M, A, B, L	$f_{AM}=\frac{ML^2}{EI_B}\times\alpha_2$	$\theta_{AM}=\frac{-ML}{EI_B}\times\beta_2$
C, M, A, B, d, L	$f_{CM}=\frac{ML_1^2}{EI_B}\times\left(\alpha_2+\frac{d}{L_1}\beta_2\right)$	$\theta_{CM}=\theta_{AM}$
A, q, B, L	$f_{Aq}=\frac{qL^4}{EI_B}\times\alpha_3$	$\theta_{Aq}=\frac{-qL^3}{EI_B}\times\beta_3$
A, q_A, q_B, B, L	$f_{Aq}=\frac{L^4}{EI_B}\times\left(q_A\alpha_3+mL\alpha_4\right)$	$\theta_{Aq}=\frac{-L^3}{EI_B}\times\left(q_A\beta_3+mL\beta_4\right)$

注 f_{xx} 为挠度，mm，其下脚标第一个字母代表作用点，第二个字母表示荷载性质；

θ_{xx} 为转角（弧度），脚标字母含义同 f_{xx}；

L 为杆长，mm；

E 为钢材弹性模量，取 2.06×10^3，N/mm²；

I_B 为 B 点处截面惯性矩见表；

F_H、M、q 分别表示水平集中力标准值，N；集中弯矩标准值，N • mm；均布荷载标准值，N/mm；

n 为系数。$n=R_A/R_B$，式中 R_A、R_B 分别为 A、B 两点的截面半径（取内外半径的平均值）。根据 n 值可在表 8-51 中查出本表有关公式中的有关系数；

m 为 $(q_B-q_A)/L$，N/mm²。

表 8-51　　钢管杆挠度计算系数表

n	α_1	β_1，α_2	β_2	α_3	β_3	α_4	β_4
0.40	0.6310	1.2500	4.3750	0.2024	0.3155	0.0490	0.0675
0.41	0.6210	1.2195	4.1939	0.2001	0.3105	0.0485	0.0667
0.42	0.6114	1.1905	4.0249	0.1979	0.3057	0.0481	0.0660
0.43	0.6022	1.1628	3.8670	0.1958	0.3011	0.0477	0.0653
0.44	0.5932	1.1364	3.7190	0.1937	0.2966	0.0474	0.0646
0.45	0.5846	1.1111	3.5802	0.1917	0.2923	0.0470	0.0639
0.46	0.5762	1.0870	3.4499	0.1897	0.2881	0.0466	0.0632
0.47	0.5681	1.0638	3.3273	0.1878	0.2840	0.0462	0.0626
0.48	0.5602	1.0417	3.2118	0.1859	0.2801	0.0459	0.0620
0.49	0.5526	1.0204	3.1029	0.1840	0.2763	0.0455	0.0613
0.50	0.5452	1.0000	3.0000	0.1822	0.2726	0.0452	0.0607
0.51	0.5380	0.9804	2.9027	0.1805	0.2690	0.1448	0.0602
0.52	0.5310	0.9615	2.8107	0.1788	0.2655	0.0445	0.0596
0.53	0.5242	0.9434	2.7234	0.1771	0.2621	0.0442	0.0590
0.54	0.5177	0.9259	2.6406	0.1754	0.2588	0.0439	0.0585
0.55	0.5112	0.9091	2.5620	0.1738	0.2556	0.0435	0.0579
0.56	0.5050	0.8929	2.4872	0.1723	0.2525	0.0432	0.0574
0.57	0.4989	0.8772	2.4161	0.1707	0.2495	0.0429	0.0569
0.58	0.4930	0.8621	2.3484	0.1692	0.2465	0.0426	0.0564
0.59	0.4873	0.8475	2.2838	0.1677	0.2436	0.0423	0.0559
0.60	0.4817	0.8333	2.2222	0.1663	0.2408	0.0420	0.0554
0.61	0.4762	0.8197	2.1634	0.1649	0.2381	0.0418	0.0550
0.62	0.4708	0.8065	2.1072	0.1635	0.2354	0.0415	0.0545
0.63	0.4656	0.7937	2.0534	0.1621	0.2328	0.0412	0.0540
0.64	0.4605	0.7813	2.0020	0.1608	0.2303	0.0409	0.0536
0.65	0.4556	0.7692	1.9527	0.1595	0.2278	0.0407	0.0532
0.66	0.4507	0.7576	1.9054	0.1582	0.2254	0.0404	0.0527
0.67	0.4460	0.7463	1.8601	0.1569	0.2230	0.0401	0.0523
0.68	0.4414	0.7353	1.8166	0.1557	0.2207	0.0399	0.0519
0.69	0.4368	0.7246	1.7748	0.1544	0.2184	0.0396	0.0515
0.70	0.4324	0.7143	1.7347	0.1532	0.2162	0.0394	0.0511
0.71	0.4281	0.7042	1.6961	0.1521	0.2140	0.0391	0.0507
0.72	0.4238	0.6944	1.6590	0.1509	0.2119	0.0389	0.0503
0.73	0.4197	0.6849	1.6232	0.1498	0.2098	0.0387	0.0499
0.74	0.4156	0.6757	1.5888	0.1487	0.2078	0.0384	0.0496
0.75	0.4117	0.6667	1.5556	0.1476	0.2058	0.0382	0.0492
0.76	0.4078	0.6579	1.5235	0.1465	0.2039	0.0380	0.0488
0.77	0.4039	0.6494	1.4927	0.1454	0.2020	0.0378	0.0485
0.78	0.4002	0.6410	1.4629	0.1444	0.2001	0.0375	0.0481

续表

n	α_1	β_1，α_2	β_2	α_3	β_3	α_4	β_4
0.79	0.3965	0.6329	1.4341	0.1433	0.1983	0.0373	0.0478
0.80	0.3929	0.6250	1.4063	0.1423	0.1965	0.0371	0.0474
0.81	0.3894	0.6173	1.3794	0.1413	0.1947	0.0369	0.0471
0.82	0.3860	0.6098	1.3534	0.1404	0.1930	0.0367	0.0468
0.83	0.3826	0.6024	1.3282	0.1394	0.1913	0.0365	0.0465
0.84	0.3792	0.5952	1.3039	0.1384	0.1896	0.0363	0.0461
0.85	0.3760	0.5882	1.2803	0.1375	0.1880	0.0361	0.0458
0.86	0.3728	0.5814	1.2574	0.1366	0.1864	0.0359	0.0455
0.87	0.3696	0.5747	1.2353	0.1357	0.1848	0.0357	0.0452
0.88	0.3665	0.5682	1.2138	0.1348	0.1833	0.0355	0.0449
0.89	0.3635	0.5618	1.1930	0.1339	0.1817	0.0353	0.0446
0.90	0.3605	0.5556	1.1728	0.1330	0.1803	0.0351	0.0443
0.91	0.3576	0.5495	1.1532	0.1322	0.1788	0.0349	0.0441
0.92	0.3547	0.5435	1.1342	0.1313	0.1774	0.0347	0.0438
0.93	0.3519	0.5376	1.1157	0.1305	0.1759	0.0345	0.0435
0.94	0.3491	0.5319	1.0978	0.1297	0.1745	0.0344	0.0432
0.95	0.3464	0.5263	1.0803	0.1289	0.1732	0.0342	0.0430
0.96	0.3437	0.5208	1.0634	0.1281	0.1718	0.0340	0.0427
0.97	0.3410	0.5155	1.0469	0.1273	0.1705	0.0338	0.0424
0.98	0.3384	0.5102	1.0308	0.1266	0.1692	0.0336	0.0422

五、钢管杆的连接

钢管杆的连接包括杆体（段之间）本身的连接，以及杆身与横担、梯子等辅助构件的连接。

(一) 杆体的连接

杆身各段之间的连接主要有套接、焊接、法兰等几种型式。

1. 套接（也称插接）

套接连接方式多用于主杆为多边形截面的杆段，而不宜用在杆体有上拔力存在的杆型。套接可以提高接头处杆体的强度，加工、施工方便，杆体美观。套接在设计、加工及施工方面应符合以下要求：

1）套接部分的杆体应贴合良好，无明显缝隙。

2）采用套接方式的钢管杆，应保证其最小轴向套接压力，见表 8-52。

表 8-52　最小轴向套接压力

外套管内对边尺寸（mm）	轴向套接压力（kN）
小于 300	40
300～500	60
500～700	80
700～900	100
900～1200	120
1200～1400	160
1400～1600	200
1600～1800	240
1800～2000	300
大于 2000	400

在承受最小轴向套接压力后，套接部分杆体不应出现相对滑动。

3）完成安装的钢管杆，其接头套接的长度不宜小于外面套入段最大内径的 1.5 倍。不能满足时，应通过试验验证钢管杆是否满足相关受力及变形方面的要求。

2. 焊接

（1）根据焊缝所处的位置、设计计算的结果，确定适当的焊缝级别，并需达到 DL/T 646 中的一、二级焊缝，应在施工图上注明。焊缝的计算可参见本章第九节关于焊缝的连接计算。

（2）杆身或横担的纵向焊缝应尽量布置在钢管的

中和轴附近。

（3）套接杆段外套接头处（1.5 倍多边形外套管内对边尺寸加 200mm 范围内）的纵向焊缝以及对接杆身环焊缝 200mm 范围内的纵向焊缝必须 100%焊透，并施行 100%超声波检查或 100%磁粉探伤。

3. 法兰

接头处采用法兰连接系法兰带在杆段上，工厂内加工制造，易保证质量，现场施工安装方便。要求杆体轴线与法兰平面应保证其垂直度，并应保证各预留连接部件方向的正确性。法兰的计算方法可参见本章第九节关于法兰连接计算。

（二）杆体与横担、梯子等部件的连接

横担不宜直接与杆身连接。在荷载作用下，横担根部的受压部位易产生应力集中，使局部受压，尤其是杆身上段，一般管壁较薄，在集中外力作用下容易使局部压曲，如增加壁厚又不经济。因此，横担与杆身的连接处，应进行局部补强，使横担传来的外力得以分散，以避免产生杆体的局部压曲。如图 8-100 所示。

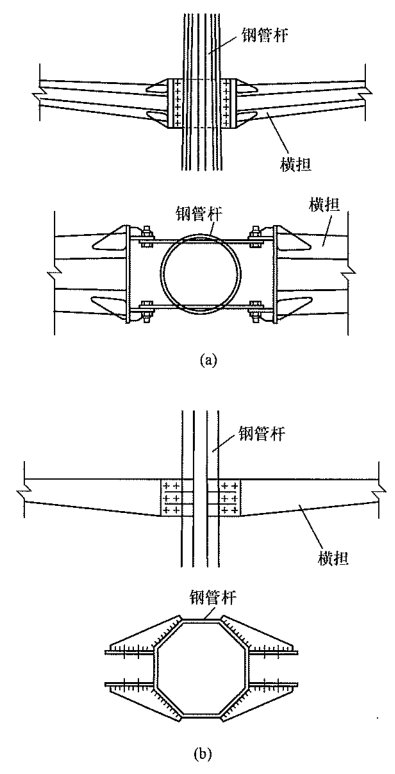


图 8-100　横担与杆身的连接

（a）插板穿透式；（b）靴梁支座式

横担与杆身的连接一般有插板穿透和靴梁支座两种方式。插板穿透式加工简便、成本较低，但受力性能较弱，不宜用于荷载较大的 220kV 以上线路中的耐张杆。靴梁支座式受力性能好，可用于各种电压等级和类型的钢管杆。

杆身开孔，有时为了连接横担、梯子和吊杆等部件时，需要在杆身的相应位置开孔，设穿心螺钉，当杆壁较薄孔壁挤压不够时，开孔处应焊接局部补强板，用以加厚杆壁的局部厚度。或者焊接穿心钢管，如图 8-101 所示。

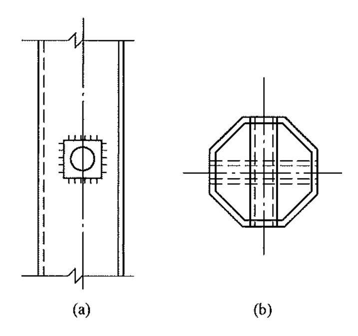


图 8-101　孔壁补强

六、构造要求

（1）主杆分段，目前国内各生产厂家所生产的钢管杆，大部分以 6～10m 为一段，这主要与杆体全高、设计受力、钢板材料规格、厂家制造设备、施工运输条件等因素有关，设计时应根据具体情况决定。

（2）钢管杆的连接构造应考虑便于加工、施工、运行维护等方面，并使结构受力简单明确，尽量避免或减少产生应力集中。

（3）受力构件及其连接部件最小厚度不宜小于 3mm，螺栓直径不宜小于 16mm。

（4）地脚螺栓的孔径宜为地脚螺栓直径的 1.1 倍，施工时应用锚栓定位模板，控制各地脚螺栓方位的正确性。各部件连接螺栓的孔径宜比螺栓直径大 1.5mm。

（5）钢管杆及其附件，一般均应热浸镀锌防腐，特殊情况时也可采用热喷涂锌等防腐措施。

（6）钢管杆顶部应加焊盖板密封。

（7）钢管杆应设置安装吊点。

（8）钢管杆身及横担应设置攀登装置。

第八节　钢结构构件截面选择

一、材料及其强度设计值

输电线路铁塔构件的材料一般采用 Q235、Q345、Q420 等钢材制作，其质量标准应分别符合现行标准，可参照本手册附录。

钢材的强度设计值，应根据钢材厚度或直径按表 8-53 采用。

表 8-53　　钢材的强度设计值　　N/mm²

材料		厚度或直径（mm）	抗拉、抗压和抗弯	抗剪	孔壁承压*
钢材	Q235	≤16	215	125	370
		＞16～40	205	120	
		＞40～60	200	115	
		＞60～100	190	110	
	Q345	≤16	310	180	510
		＞16～35	295	170	490
		＞35～50	265	155	440
		＞50～100	250	145	415
	Q390	≤16	350	205	530
		＞16～35	335	190	510
		＞35～50	315	180	480
		＞50～100	295	170	450
	Q420	≤16	380	220	560
		＞16～35	360	210	535
		＞35～50	340	195	510
		＞50～100	325	185	480
	Q460	≤16	415	240	595
		＞16～35	395	230	575
		＞35～50	380	220	560
		＞50～100	360	210	535

* 适用于构件上螺栓端距大于等于 1.5d（d 螺栓直径）。

所有杆塔的钢材均应满足不低于 B 级钢的质量要求。当结构工作温度不高于−40℃时，Q235、Q345、Q390 焊接构件和 Q420 钢材质量等级应满足不低于 C 级钢的质量要求，Q460 钢材质量等级应满足不低于 D 级钢的质量要求，螺栓孔宜采用钻孔工艺。

二、构件的长细比

钢结构构件允许最大长细比应符合表 8-54 的规定。

表 8-54　钢结构构件允许最大长细比

项　目	钢结构构件允许最大长细比
受压主材	150
受压材	200
辅助材	250
受拉材（预应力的拉杆可不受长细比限制）	400

拉线杆塔主柱允许最大长细比应符合表 8-55 的规定。

表 8-55　拉线杆塔主柱允许最大长细比

项　目	拉线杆塔主柱允许最大长细比
普通混凝土直线杆	180
预应力混凝土直线杆	200
耐张转角和终端塔	160
单柱拉线铁塔主柱	80
双柱拉线铁塔主柱	110

三、拉线截面选择

当拉线采用镀锌钢绞线时，其强度设计值应按式（8-155）计算，即

$$\left.\begin{aligned} f_t &= \frac{f_u \cdot \gamma_Q \cdot K_s}{K_c} \\ T &\leqslant Af_t \end{aligned}\right\} \tag{8-155}$$

式中 f_t ——镀锌钢绞线强度设计值，N/mm²；

f_u ——镀锌钢丝抗拉强度标准值（也称作公称抗拉强度），N/mm²；

K_s ——换算系数（也称作捻合系数），7 股 0.92，19 股 0.90，37 股 0.85；

K_c ——安全系数，电力行业中的杆塔拉线安全系数一般取 2.2；

γ_Q ——可变荷载分项系数取 1.4；

T ——镀锌钢绞线承受的拉力设计值，N；

A ——镀锌钢绞线的截面积，mm²。

以上参数可按国家标准《镀锌钢绞线》的规定选用。

四、构件截面选择

(一) 轴心受力构件

轴心受力构件的强度计算应符合下列规定：

$$N / A_n \leqslant mf \tag{8-156}$$

式中 N ——轴心拉力或轴心压力设计值，N；

m ——构件强度折减系数，应符合表 8-56 的规定；

A_n ——构件净截面面积，mm²。对多排螺栓连接的受拉构件，要计及锯齿形破坏情况；

f ——钢材的强度设计值，N/mm²。

表 8-56　构件强度折减系数

受压构件		受拉构件	
双肢连接的角钢构件	1.0	双肢连接的角钢构件	1.0
单肢连接的角钢构件及偏心连接的钢管构件	0.85	单肢连接的角钢构件（肢宽＞40mm）	0.7
组合断面构件（无偏心）	1.0	单肢连接的角钢构件（肢宽≤40mm）	0.55
组合断面构件（有偏心）	0.85		

当角钢的两个肢上都有螺栓孔或一个肢上的螺栓孔为两列或两列以上的，还需验算杆件沿斜截面破坏时的强度，可参考下述方法计算。

1. 板的净截面积

拉杆的净截面积等于板的净宽与板厚的乘积，板的净宽则是板宽减去螺栓孔的总宽。但当板上有多列螺栓孔，且符合 $d_0 > s_i^2 / 4g$ 时（见图 8-102），拉杆可能会沿某一锯齿形截面破坏，这时板的净宽应将板的总宽度减去此一锯齿形截面所通过的各个螺栓孔再减去式（8-157）所给出的宽度 ω_i 之和。

$$\omega_i = d_0 - s_i^2 / 4g_i \tag{8-157}$$

式中 d_0 ——螺栓孔径，mm；

S ——螺栓列距，mm；

g ——螺栓行距，mm。

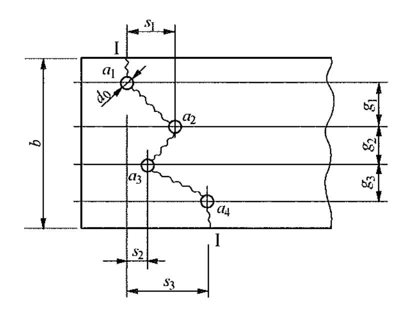


图 8-102　拉杆沿锯齿形截面破坏

如图 8-102 所示的钢板，如沿 I-I 所示的锯齿形截面破坏，对于螺栓 α_1 应扣除 d_0，对于螺栓 α_i（$i=2\sim4$）应扣除 $\omega_i = d_0 - s_i^2 / 4g_i$，则此板净宽为 $b_n = b - d_0 - \sum_{i=2}^{4}\left(d_0 - \dfrac{s_i^2}{4g_i}\right) = b - 4d_0 + \sum_{i=2}^{4}\dfrac{s_i^2}{4g_i}$ 或者 $b_n = b - 4d_0 + \left(\dfrac{s_1^2}{4g_1} + \dfrac{s_2^2}{4g_2} + \dfrac{s_3^2}{4g_3}\right)$。

2. 角钢的净截面积

对于角钢，可先将其展开，展开后的总宽度为其两肢宽度之和减去肢厚，如图 8-103 所示，两肢间螺栓孔中心线间的距离 $g = g_3 + (g_1 - t)$，当角钢沿 I-I 截面破坏时，应减孔数 $n = 2$；沿 II-II 截面破坏时，应减孔数 $n = 3 - \left(\dfrac{s^2}{4g_2} + \dfrac{s^2}{4g}\right)\dfrac{1}{d_0}$。

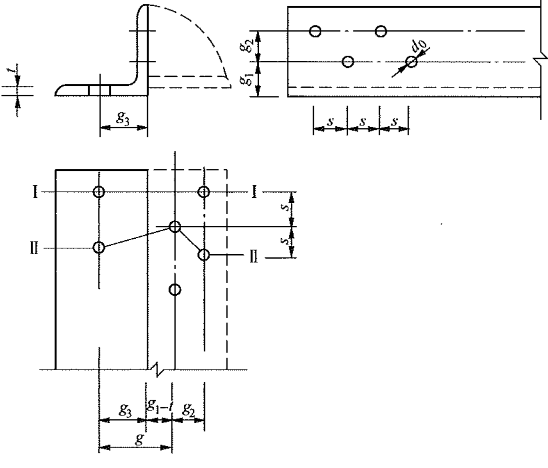


图 8-103　角钢沿锯齿形截面破坏

据铁塔上常见的螺栓排列方式，角钢应减的螺栓孔数可按表 8-57 计算。

表 8-57　　受拉角钢减孔数

序号	图 例	减 孔 数
1		沿 1-1 截面　$n=2$
2		沿 1-1 截面　$n=1$ 沿 2-2 截面　$n=2-\dfrac{S^2}{4gd_0}$；$g=2d_1-t$ 取以上两式中较大值
3		沿 1-1 截面　$n=2$ 沿 2-2 截面　$n=3-\dfrac{S^2}{4g_3d_0}$ 沿 3-3 截面　$n=4-\dfrac{S^2}{4d_0}\left(\dfrac{1}{g_1}+\dfrac{1}{g_2}+\dfrac{1}{g_3}\right)$ $g_2=2d_1-t$ 取以上三式中较大值 d_0 为螺栓孔径

（二）轴心受压构件的稳定计算

轴心受压构件的稳定计算应符合下列规定（适用于 B 类截面）

$$N/(\varphi\cdot A)\leqslant m_N\cdot f \tag{8-158}$$

$$\text{当}\ \frac{b}{t}\leqslant\left(\frac{b}{t}\right)_{\lim}\ \text{时，}\ m_N=1.0$$

$$\text{当}\ \left(\frac{b}{t}\right)_{\lim}<\frac{b}{t}\leqslant\frac{380}{\sqrt{f_y}}\ \text{时，}\ m_N=1.677-0.677\frac{\frac{b}{t}}{\left(\frac{b}{t}\right)_{\lim}} \tag{8-159}$$

对轴心受压构件

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{\lim}=(10+0.1\lambda)\sqrt{\frac{235}{f_y}} \tag{8-160}$$

对压弯构件

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{\lim}=15\sqrt{\frac{235}{f_y}} \tag{8-161}$$

式中　A ——构件毛截面面积，mm²；

λ ——构件长细比，当 $\lambda<30$ 时，取 $\lambda=30$；当 $\lambda>100$ 时，取 $\lambda=100$；

m_N ——压杆稳定强度折减系数，根据翼缘板自由外伸宽度 b（见图 8-104）与厚度 t 之比计算确定；

φ ——轴心受压构件稳定系数。

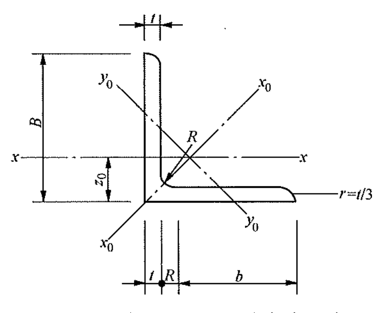


图 8-104　翼缘板自由外伸宽度示意图

（1）轴心受压构件的稳定系数。轴心受压构件稳定系数 φ 见表 8-60～表 8-61，按下列公式计算得

$$\text{当}\ \bar{\lambda}=\frac{\lambda}{\pi}\sqrt{\frac{f_y}{E}}\leqslant 0.215\ \text{时，}\ \varphi=1-\alpha_1\bar{\lambda}^2 \tag{8-162}$$

当 $\bar{\lambda}>0.215$ 时，

$$\varphi=\frac{1}{2\bar{\lambda}^2}\left[(\alpha_2+\alpha_3\bar{\lambda}+\bar{\lambda}^2)-\sqrt{(\alpha_2+\alpha_3\bar{\lambda}+\bar{\lambda}^2)^2-4\bar{\lambda}^2}\right] \tag{8-163}$$

式中　α_1、α_2、α_3——系数，根据表 8-58 的截面分类按表 8-59 采用。

表 8-58　　轴心受压钢构件的截面分类

截面类别	截面形式和对应轴线			
a 类	圆形及多边形，轧制管			
b 类	焊接		轧制四角钢	
	轧制双角钢		轧制双角钢	
	轧制等边角钢		轧制等边角钢	
	格构式		格构式	
	格构式			

表 8-59　　系　数 α_1、α_2、α_3

截面分类	α_1	α_2	α_3
a 类	0.41	0.986	0.152
b 类	0.65	0.965	0.300

（2）杆件轴心受压构件稳定系数 φ 应根据构件长细比 $k\lambda$ 按表 8-60 和表 8-61 采用。

表 8-60　　a 类截面轴心受压构件的稳定系数 φ

$k\lambda\sqrt{\frac{f_y}{235}}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1.000	1.000	1.000	1.000	0.999	0.999	0.998	0.998	0.997	0.996
10	0.995	0.994	0.993	0.992	0.991	0.989	0.988	0.986	0.985	0.983
20	0.981	0.979	0.977	0.976	0.974	0.972	0.970	0.968	0.966	0.964

续表

$k\lambda\sqrt{\frac{f_y}{235}}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
30	0.963	0.961	0.959	0.957	0.955	0.952	0.950	0.948	0.946	0.944
40	0.941	0.939	0.937	0.934	0.932	0.929	0.927	0.924	0.921	0.919
50	0.916	0.913	0.910	0.907	0.904	0.900	0.897	0.894	0.890	0.886
60	0.883	0.879	0.875	0.871	0.867	0.863	0.858	0.854	0.849	0.844
70	0.839	0.834	0.829	0.824	0.818	0.813	0.807	0.801	0.795	0.789
80	0.783	0.776	0.770	0.763	0.757	0.750	0.743	0.736	0.728	0.721
90	0.714	0.706	0.699	0.691	0.684	0.676	0.668	0.661	0.653	0.645
100	0.638	0.630	0.622	0.615	0.607	0.600	0.592	0.585	0.577	0.570
110	0.563	0.555	0.548	0.541	0.534	0.527	0.520	0.514	0.507	0.500
120	0.494	0.488	0.481	0.475	0.469	0.463	0.457	0.451	0.445	0.440
130	0.434	0.429	0.423	0.418	0.412	0.407	0.402	0.397	0.392	0.387
140	0.383	0.378	0.373	0.369	0.364	0.360	0.356	0.351	0.347	0.343
150	0.339	0.335	0.331	0.327	0.323	0.320	0.316	0.312	0.309	0.305
160	0.302	0.298	0.295	0.292	0.289	0.285	0.282	0.279	0.276	0.273
170	0.270	0.267	0.264	0.262	0.259	0.256	0.253	0.251	0.248	0.246
180	0.243	0.241	0.238	0.236	0.233	0.231	0.229	0.226	0.224	0.222
190	0.220	0.218	0.215	0.213	0.211	0.209	0.207	0.205	0.203	0.201
200	0.199	0.198	0.196	0.194	0.192	0.190	0.189	0.187	0.185	0.183
210	0.182	0.180	0.179	0.177	0.175	0.174	0.172	0.171	0.169	0.168
220	0.166	0.165	0.164	0.162	0.161	0.159	0.158	0.157	0.155	0.154
230	0.153	0.152	0.150	0.149	0.148	0.147	0.146	0.144	0.143	0.142
240	0.141	0.140	0.139	0.138	0.136	0.135	0.134	0.133	0.132	0.131
250	0.130	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表 8-61　　　　b 类截面轴心受压构件的稳定系数φ

$k\lambda\sqrt{\frac{f_y}{235}}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1.000	1.000	1.000	0.999	0.999	0.998	0.997	0.996	0.995	0.994
10	0.992	0.991	0.989	0.987	0.985	0.983	0.981	0.978	0.976	0.973
20	0.970	0.967	0.963	0.960	0.957	0.953	0.950	0.946	0.943	0.939
30	0.936	0.932	0.929	0.925	0.922	0.918	0.914	0.910	0.906	0.903
40	0.899	0.895	0.891	0.887	0.882	0.878	0.874	0.870	0.865	0.861
50	0.856	0.852	0.847	0.842	0.838	0.833	0.828	0.823	0.818	0.813
60	0.807	0.802	0.797	0.791	0.786	0.780	0.774	0.769	0.763	0.757
70	0.751	0.745	0.739	0.732	0.726	0.720	0.714	0.707	0.701	0.694
80	0.688	0.681	0.675	0.668	0.661	0.655	0.648	0.641	0.635	0.628
90	0.621	0.614	0.608	0.601	0.594	0.588	0.581	0.575	0.568	0.561
100	0.555	0.549	0.542	0.536	0.529	0.523	0.517	0.511	0.505	0.499

续表

$k\lambda\sqrt{\frac{f_y}{235}}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
110	0.493	0.487	0.481	0.475	0.470	0.464	0.458	0.453	0.447	0.442
120	0.437	0.432	0.426	0.421	0.416	0.411	0.406	0.402	0.397	0.392
130	0.387	0.383	0.378	0.374	0.370	0.365	0.361	0.357	0.353	0.349
140	0.345	0.341	0.337	0.333	0.329	0.326	0.322	0.318	0.315	0.311
150	0.308	0.304	0.301	0.298	0.294	0.291	0.288	0.285	0.282	0.279
160	0.276	0.273	0.270	0.267	0.265	0.262	0.259	0.256	0.254	0.251
170	0.249	0.246	0.244	0.241	0.239	0.236	0.234	0.232	0.229	0.227
180	0.225	0.223	0.220	0.218	0.216	0.214	0.212	0.210	0.208	0.206
190	0.204	0.202	0.200	0.198	0.197	0.195	0.193	0.191	0.190	0.188
200	0.186	0.184	0.183	0.181	0.180	0.178	0.176	0.175	0.173	0.172
210	0.170	0.169	0.167	0.166	0.165	0.163	0.162	0.160	0.159	0.158
220	0.156	0.155	0.154	0.153	0.151	0.150	0.149	0.148	0.146	0.145
230	0.144	0.143	0.142	0.141	0.140	0.138	0.137	0.136	0.135	0.134
240	0.133	0.132	0.131	0.130	0.129	0.128	0.127	0.126	0.125	0.124
250	0.123									

（3）构件长细比修正：

$$K\lambda = KL_0 / r \qquad (8\text{-}164)$$

式中 K——角钢构件长细比修正系数，对格构式组合构件 K=1；

λ——构件长细比；

L_0——构件的计算长度；

r——构件断面回转半径，根据失稳方向确定。

1）两端双肢连接的角钢主材长细比修正系数 K=1。

2）其他受压构件长细比修正系数按表 8-62 计算。

表 8-62　受压构件长细比修正系数 *K*

序号	杆件端部受力状况	长细比	长细比修正系数 K	适用角钢构件举例
1	两端中心受压	$0<L_0/r<120$	1	双肢连接的构件
2	一端中心另端偏心受压	$0<L_0/r<120$	0.75+30/（L_0/r）	（1）一端双肢连接另端单肢连接的构件；（2）交叉斜材
3	两端偏心受压	$0<L_0/r<120$	0.5+60/（L_0/r）	两端单肢连接的构件
4	两端无约束	$120\leqslant L_0/r\leqslant 200$	1	单个螺栓连接的交叉斜材和单斜材
5	一端有约束	$120\leqslant L_0/r\leqslant 225$	0.762+28.6/（L_0/r）	两个以上螺栓连接的交叉斜材
6	两端有约束	$120\leqslant L_0/r\leqslant 250$	0.615+46.2/（L_0/r）	两端均有两个以上螺栓连接的构件

3）辅助材长细比修正系数按表 8-63 计算。

表 8-63　辅助材长细比修正系数 *K*

序号	杆件端部受力状况	长细比	长细比修正系数 K	适用角钢构件举例
1	两端偏心受压	$0<L_0/r<120$	1	两端单肢连接的构件
2	两端无约束	$120\leqslant L_0/r\leqslant 250$	1	单个螺栓连接的交叉斜材和单斜材
3	一端有约束	$120\leqslant L_0/r\leqslant 290$	0.762+28.6（L_0/r）	两个以上螺栓连接的交叉斜材
4	两端有约束	$120\leqslant L_0/r\leqslant 330$	0.615+46.2/（L_0/r）	两端均有两个以上螺栓连接的构件

4）节点对所连接构件具有部分扭转约束的条件：

a）被约束的杆件必须有至少两个螺栓连接到提供约束的构件上；

b）提供约束的杆件在应力平面内的刚度系数 I/L（I 为惯性矩，L 为长度）必须等于或大于连接的被约束杆件在应力平面内的刚度系数总和；

c）节点偏心尽可能小。单肢连接的角钢上的螺孔应在角钢背与连接肢中心线之间。

5）钢管构件宜按照两端中心受力考虑，杆端相贯焊接考虑有约束，杆端插板连接考虑没有约束。

（4）格构式组合构件换算长细比按表 8-64 计算。

表 8-64　　格构式组合构件换算长细比计算公式表

项次	组合断面型式	缀材类别	计算公式	符号说明
1	方形断面	缀板	$\lambda_{hx}=\sqrt{\lambda_x^2+\lambda_1^2}$ $\lambda_{hy}=\sqrt{\lambda_y^2+\lambda_1^2}$	λ_{hx}、λ_{hy} 为组合构件对虚轴 x-x、y-y 的换算长细比； λ_x、λ_y 为整个构件对虚轴 x-x、y-y 的长细比； λ_1 为单肢对最小刚度轴 i-i 的长细比； A_{1x}、A_{1y} 为构件断面所截垂直于 x-x、y-y 轴平面内各斜缀条毛截面面积之和； A_1 为构件横截面所截各斜缀条的毛截面面积之和； A 为组合构件横截面所截各肢的毛截面面积总和； θ为缀条所在平面和 x 轴的夹角
2		缀条	$\lambda_{hx}=\sqrt{\lambda_x^2+40\dfrac{A}{A_{1x}}}$ $\lambda_{hy}=\sqrt{\lambda_y^2+40\dfrac{A}{A_{1y}}}$	
3	三角形断面	缀条	$\lambda_{hx}=\sqrt{\lambda_x^2+\dfrac{42A}{A_1(1.5-\cos^2\theta)}}$ $\lambda_{hy}=\sqrt{\lambda_y^2+\dfrac{42A}{A_1\cos^2\theta}}$	

（5）双轴对称十字形截面组合角钢构件，见图 8-105。按式（8-165）计算其等效回转半径。

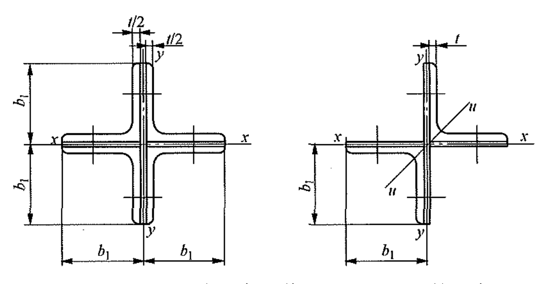


图 8-105　双轴对称十字形截面组合角钢构件示意图

$$r_t=\frac{t}{2b_1}\sqrt{\frac{b_1^2}{3}+0.16L^2} \tag{8-165}$$

式中 r_t ——十字断面等效回转半径，$r_t\geqslant r_x$、$r_t\geqslant r_y$ 或 $r_t\geqslant r_u$ 时，取 $r_t=r_x$、$r_t=r_y$ 或 $r_t=r_u$；

b_1 ——十字断面形心至边缘的距离，mm；

L ——构件计算长度，mm。

（6）构件的计算长度。

1）主材计算长度按表 8-65 采用。

2）交叉斜材计算长度按表 8-66 采用。

3）K 型斜材计算长度按表 8-67 采用。

表 8-65　　主 材 计 算 长 度 表

结构型式	计算长度 L_0	计算回转半径 r
	L	r_{y0}

续表

结构型式	计算长度 L_0	计算回转半径 r
	$1.2L$	r_x
	$1.2L$	r_x
	$2L/3$	r_{y_0}

注　角钢为等边角钢。

表 8-66　　交叉斜材计算长度表

序号	结构型式	两根斜材为一拉一压且拉杆内力≥20%压杆内力时		两根斜材为一拉一压且拉杆内力<20%压杆内力或两根斜材同时受压时	
		计算长度 L_0	计算回转半径 r	计算长度 L_0	计算回转半径 r
1		L_2	r_{y0}	K_2L_3	r_x
2		$1.1L_2$	r_x	K_2L_3	r_x
3		L_2	r_x	—	—

续表

序号	结构型式	两根斜材为一拉一压且拉杆内力≥20%压杆内力时		两根斜材为一拉一压且拉杆内力<20%压杆内力或两根斜材同时受压时	
		计算长度 L_0	计算回转半径 r	计算长度 L_0	计算回转半径 r
4		$1.1L_2$	r_x	K_2L_3	r_x
5		$1.1L_2$	r_x	K_2L_3	r_x

注 1. 角钢为等边角钢。
2. 图例 1、2、4、5 交叉斜材在交叉处均不允许断开，图例 3 交叉斜材在交叉处可以断开。
3. 当两根斜材同时受压时，斜材选材容许长细比可取同辅助材。
4. K_2 为交叉斜材计算长度修正系数。

K_2 计算式按下确定：

两根斜材一拉一压时：

$$K_2=\sqrt{(L_2/L_3)(1-3N_0/4N)}\geqslant 0.5 \quad (8\text{-}166)$$

两根斜材同时受压时：

$$K_2=\sqrt{0.5(1+N_0/N)} \quad (8\text{-}167)$$

式中 N——所计算杆的内力，取绝对值；

N_0——相交另一杆的内力，取绝对值；两根斜材同时受压时，取 $N_0 \leqslant N$。

表 8-67　　K 型斜材计算长度表

序号	结构型式	两根斜材为一拉一压时		交于主材同一点的相邻斜材为压杆时	
		计算长度 L_0	计算回转半径 r	计算长度 L_0	计算回转半径 r
1		L_1	r_{y0}	$0.65L_2$	r_x
2		L_1	r_{y0}	—	—
3		L_1	r_{y0}	$0.55L_3$（$\alpha \geqslant 0.25$）	r_x

续表

序号	结构型式	两根斜材为一拉一压时		交于主材同一点的相邻斜材为压杆时	
		计算长度 L_0	计算回转半径 r	计算长度 L_0	计算回转半径 r
4		L_1	r_{y0}	$0.55L_3$ （$\alpha \geqslant 0.4$） $0.65L_2$ （$\alpha \geqslant 1.0$）	r_x

注　1. 角钢为等边角钢。

2. 塔腿斜材计算长度应乘以 1.2 增大系数。

3. 当交于主材同一点的相邻斜材均为压杆时，斜材选材容许长细比可取同辅助材。

4. 图例 3 和图例 4 所示平连杆应视作受力构件与塔体同时计算，其中α为平连杆与斜材的刚度比，按下式计算确定：

$$\alpha = I_4L_3^3/(I_3L_4^3) \tag{8-168}$$

式中　L_3、L_4——斜材、平连杆全长，mm；

I_3、I_4——斜材、平连杆的平行轴惯性矩，mm^4。

4）K 型腹杆系水平杆的计算长度。图 8-106 为 K 形腹杆水平杆的计算长度按式（8-169）计算，有

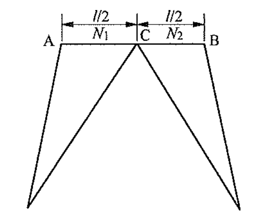


图 8-106　K 形腹杆系的水平杆（C 点平面外无支撑）

$$l_0=kl \tag{8-169}$$

$$\left.\begin{aligned} k &= 0.75+0.25\frac{N_2}{N_1}(N_1 > N_2\text{，且均为压力}) \\ \text{或}\quad k &= 0.75-0.25\frac{N_2}{N_1}(N_1\text{为压力，}N_2\text{为拉力}) \end{aligned}\right\} \tag{8-170}$$

符号意义如图 8-106 所示。

（7）轴心受压构件应按下式计算剪力 V，即

$$V=\frac{N}{85\varphi}\sqrt{\frac{f_y}{235}} \tag{8-171}$$

注 1. 剪力值可认为沿构件全长不变。

2. 对格构式轴心受压构件，剪力 V 应由承受剪力的缀材面（包括用整体板连接的面）分担。

（三）受弯、压弯及拉弯构件计算

（1）拉弯构件和压弯构件弯矩平面内的强度计算为

$$\frac{N}{mA_n}\pm\frac{M_x}{W_x}\pm\frac{M_y}{W_y}\leqslant f \tag{8-172}$$

式中　M_x、M_y——同一截面处绕 x 轴和 y 轴的弯矩设计值，N·mm；

W_x、W_y——对 x 轴和 y 轴的净截面模量，mm^3。

（2）实腹式压弯构件弯矩平面内的稳定计算为

$$\left.\begin{aligned} &\frac{N}{\varphi m_N A}+\frac{M}{W\left(1-0.8\times\dfrac{N}{N_{EX}}\right)}\leqslant f \\ &N_{EX}=\pi^2EA/(1.1\lambda_x^2) \end{aligned}\right\} \tag{8-173}$$

式中　M——弯矩设计值，N·mm；

W——截面抵抗矩，mm^3；

N_{EX}——参数；

E——钢材的弹性模量，N/mm^2；

A——构件的毛截面面积，mm^2；

λ_x——构件绕 $x-x$ 轴的长细比。

五、组合构件截面选择

（一）由角钢组成的 T 型、十字型组合截面构件

由角钢组成的 T 型、十字型组合截面构件的强度可按式（8-156）～式（8-173）计算。但为保证两角钢能共同工作，在两角钢间应设置填板。填板间距：对受压构件应不大于 $40r$，对受拉杆件应不大于 $80r$（见图 8-107），且在一个节间内的填板数量不应小于 2 块（不包括构件两端的节点板）。其中 r 对 T 型截面取 r_x，对十字型截面取 r_{y0}。

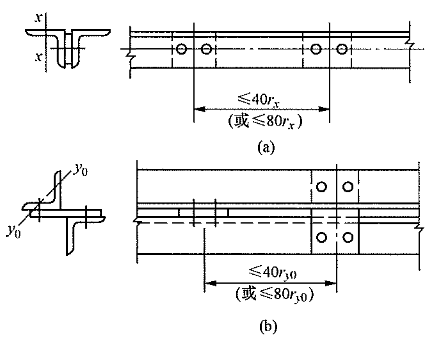


图 8-107 双角钢组合构件填板的设置
（a）T 型截面；（b）十字型截面

（二）格构式组合构件

格构式组合构件常用槽钢、工字钢、角钢或钢管作柱肢，以缀条或缀板作连缀件，构成矩形或三角形截面结构。缀条多用单角钢或钢管制成，重型柱中也可以用槽钢，缀板常用钢板制作。现多采用缀条连接。

格构式轴心受压构件的强度和稳定仍应按式（8-156）和式（8-158）计算，但对于虚轴［见图 8-108（a）］的 x 轴和图 8-108（b）、（c）的 x 轴和 y 轴的长细比应取换算长细比。换算长细比应按下列公式计算：

1. 双肢组合构件［见图 8-108（a）］

当缀件为缀板时

$$\lambda_{0x}=\sqrt{\lambda_x^2+\lambda_1^2} \tag{8-174}$$

当缀件为缀条时

$$\lambda_{0x}=\sqrt{\lambda_x^2+27\frac{A}{A_{1x}}} \tag{8-175}$$

式中 λ_x ——整个构件对 x 轴的长细比；

λ_1 ——分肢对最小刚度轴 1-1 的长细比，其计算长度取为：焊接时，为相邻两缀板的净距离；螺栓连接时，为相邻两缀板边缘螺栓的距离；

A_{1x} ——构件截面中垂直于 x 轴的各斜缀条毛截面面积之和。

2. 四肢组合构件［见图 8-108（b）］

当缀件为缀板时

$$\lambda_{0x}=\sqrt{\lambda_x^2+\lambda_1^2} \tag{8-176}$$

$$\lambda_{0y}=\sqrt{\lambda_y^2+\lambda_1^2} \tag{8-177}$$

当缀件为缀条时

$$\lambda_{0x}=\sqrt{\lambda_x^2+40\frac{A}{A_{1x}}} \tag{8-178}$$

$$\lambda_{0y}=\sqrt{\lambda_y^2+40\frac{A}{A_{1y}}} \tag{8-179}$$

式中 λ_y ——整个构件对 y 轴的长细比；

A_{1y} ——构件截面中垂直于 y 轴的各斜缀条毛截面面积之和。

3. 缀件为缀条的三肢组合构件［见图 8-108（c）］

$$\lambda_{0x}=\sqrt{\lambda_x^2+\frac{42A}{A_1(1.5-\cos^2\theta)}} \tag{8-180}$$

$$\lambda_{0y}=\sqrt{\lambda_y^2+\frac{42A}{A_2\cos^2\theta}} \tag{8-181}$$

式中 A_1 ——构件截面中各斜缀条毛截面面积之和；

θ ——构件截面内缀条所在平面与 x 轴的夹角。

需要注意的是：

（1）缀板柱中，同一截面处缀板（或型钢横杆）的线刚度之和不得小于柱较大分肢线刚度的 6 倍。

（2）斜缀条与构件轴线间的夹角应在 40°～70°范围内。

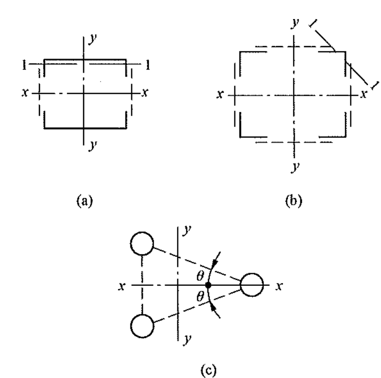


图 8-108 格构式组合构件截面

4. 变截面格构式组合柱计算长度的修正

对于沿柱子长度改变截面尺寸的格构式组合柱（见图 8-109），在验算其稳定时，应据截面变化情况，按式（8-182）修正其计算长度。

$$l_0=\mu l \tag{8-182}$$

式中 μ ——变截面格构式组合柱计算长度修正系数，按表 8-68 选用。

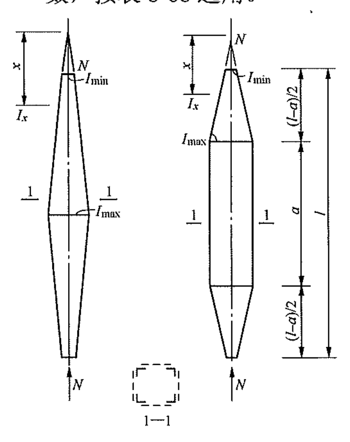


图 8-109 对称变化的格构式变截面柱

表 8-68　两端绞支对称变化的格构式变截面组合柱计算长度修正系数 μ

$\frac{I_{min}}{I_{max}}$	n	a/l				
		0	0.2	0.4	0.6	0.8
0.1	2	1.35	1.22	1.10	1.03	1.00
0.2	2	1.25	1.15	1.07	1.02	1.00
0.4	2	1.14	1.08	1.04	1.01	1.00
0.6	2	1.08	1.05	1.02	1.01	1.00
0.8	2	1.03	1.02	1.01	1.00	1.00

注　1. 表中 $n=2$ 系指由四根角钢组成用缀条或缀板联系的组合柱，其刚度变化符合 $\frac{I_x}{I_{min}}=\left(\frac{x}{x_1}\right)^2$ 的规律。

2. 本表摘自 GB/T 3811—2008《起重机设计规范》。

5. 格构式组合柱的缀条和缀板设计

为了保证格构式构件的共同工作，应对缀条和缀板的受力情况进行必要的计算并满足其构造要求。轴心受压构件受力后的压缩、荷载和构造上的偶然偏心，以及失稳时的挠曲等都可能使缀条和缀板受力。通常可按轴心受压构件由于失稳出现弯曲时所产生的剪力来估算缀条和缀板的内力。计算格构式压弯构件的缀件时，应取构件的实际剪力和按式（8-174）计算的剪力两者中的较大值进行计算。剪力 V 值可以认为沿构件全长不变，并由有关承受该剪力的缀材面（包括用整体板件连接的面）分担。缀条的内力应按桁架腹杆计算。斜缀条与构件轴线间倾角应保持在 40°～70° 范围内。

6. 组合柱主角钢的强度和稳定验算

当组合柱的整体细长度小于主角钢单肢的局部系长度时，应验算主角钢单肢的稳定，此时各肢的受力为

对矩形截面组合柱

$$N_1=\frac{M}{2B}+\frac{N}{4} \tag{8-183}$$

对三角形截面组合柱

$$N_1=\frac{M}{b}+\frac{N}{3}\ 或\ N_2=\frac{M}{2b}+\frac{N}{3} \tag{8-184}$$

式中　M ——柱子最大弯矩，N·mm；

N ——柱子最大弯矩处的轴向压力，N；

B ——矩形柱边长，根据弯矩作用方向取 B_1 或 B_2，mm；

b ——三角形柱截面高度，mm。

7. 压弯构件计算

在杆塔设计中常遇到大细长度的压弯构件，如拉线塔的主杆、主柱等。这类构件的特点是在压力和横向力的共同作用下，柱子横向变形迅速增大，最后导致整体失稳而破坏。根据经验，对这类构件宜采用压弯构件的方法来验算其整体和局部稳定。

（1）压弯构件的挠度计算。假设柱子在压力作用下达到临界状态时，其挠曲轴的曲线为一段正弦曲线（见图 8-110），则

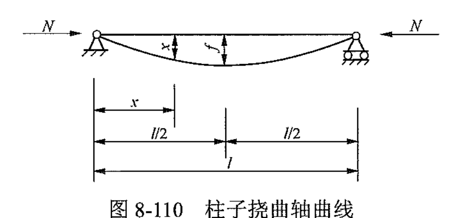


图 8-110　柱子挠曲轴曲线

$$y=f\sin\frac{\pi x}{l} \tag{8-185}$$

式中　y ——柱子任意点的挠度，mm；

f ——柱子中点的挠度，mm；

l ——柱子长度，mm；

x ——任意点至柱子端部的距离，mm。

式(8-185)所表示的挠曲轴曲线是一条近似曲线，但对于两端铰支的受压杆它符合边界条件

$$\left.\begin{aligned}x=0,\ y=0,\ y''=0\\ x=l,\ y=0,\ y''=0\end{aligned}\right\} \tag{8-186}$$

因此，用它来代替实际的变形曲线时，所引起的误差在 2%以内。

1）在轴向压力和横向均布荷载共同作用下的挠度

$$y_1=\frac{5}{384}\times\frac{ql^4}{EI}\times\frac{1}{1-\frac{N}{N_{EU}}}\sin\frac{\pi x}{l}=f_1\frac{1}{1-\frac{N}{N_{EU}}}\sin\frac{\pi x}{l} \tag{8-187}$$

式中　N_{EU} ——构件的欧拉力，$N_{EU}=\frac{\pi^2 EI}{l^2}$，N；

EI ——构件的抗弯刚度，N·mm²。

其他符号意义见图 8-111。

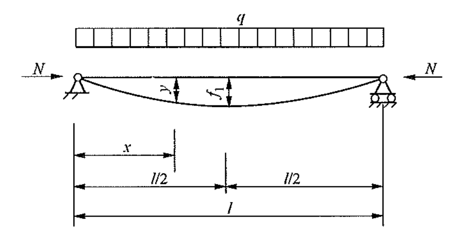


图 8-111　柱子在轴向压力和横向均布荷载共同作用下的挠曲

2）在轴向压力和横向力共同作用下的挠曲（见图 8-112）。

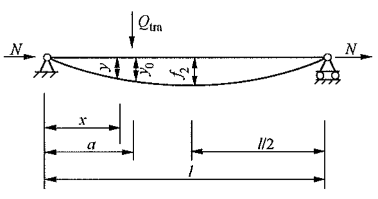


图 8-112　柱子在轴向力和横向力共同作用下的挠曲

$$y_2 = \frac{Q(3l^2-4a^2)}{48EI} \times \frac{1}{1-\frac{N}{N_{EU}}} \sin\frac{\pi x}{l} \tag{8-188}$$
$$= f_2 \frac{1}{1-\frac{N}{N_{EU}}} \sin\frac{\pi x}{l}$$

式中　Q——横向集中力，N。

3）由柱子初弯曲引起的挠曲（见图 8-113）。

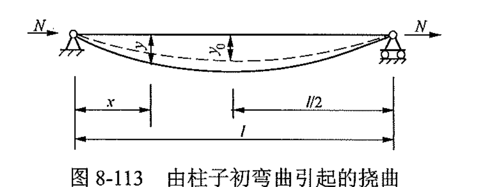


图 8-113　由柱子初弯曲引起的挠曲

$$y_3 = y_0 \frac{1}{1-\frac{N}{N_{EU}}} \sin\frac{\pi x}{l} \tag{8-189}$$

式中　y_0——柱子中部的初弯曲，mm。

4）由初偏心引起的挠曲（见图 8-114）。

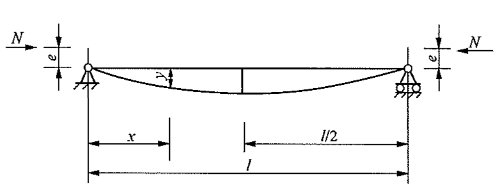


图 8-114　由初偏心引起的挠曲

$$y_4 = e \cdot \left(\sec\frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{N}{N_{EU}}} - 1\right) \cdot \sin\frac{\pi x}{l} \tag{8-190}$$

式中　e——压力作用点的初偏心，mm。

（2）弯矩计算。压弯构件的弯矩由两部分组成：一部分是由横向荷载（q 和 Q）产生的弯矩和初偏心产生的弯矩，即 M_0；另一部分则是由于柱子挠曲后在压力作用下增加的弯矩，故任意截面的弯矩应按式（8-191）计算。

$$M_x = M_0 + N\Sigma y = M_0 + N(y_1 + y_2 + y_3 + y_4) \tag{8-191}$$

（3）柱子整体稳定和局部稳定验算。

柱子整体稳定按式（8-192）验算，即

$$\frac{N}{\varphi \cdot m_N \cdot A} + \frac{M}{W} \leqslant f \tag{8-192}$$

式中　M——弯矩设计值，N·mm；

W——截面抵抗矩，mm^3；

φ——受压稳定系数，由换算长细比确定；

m_N——压杆稳定强度折减系数；

A——柱子横截面积，mm^2。

主角钢所受的压力按式（8-183）和式（8-184）计算，主角钢局部稳定按式（8-158）验算。

（4）关于初偏心和初弯曲的取值。根据目前有关规定，对钢结构主柱初弯曲可取 $y_0 = \frac{1}{750}l$（l 为柱子全长）；初偏心应根据具体构造计算，一般可取拉线挂点到主柱中心的距离。对钢筋混凝土电杆，初弯曲可取 $y_0 = \frac{2}{1000}l$。

六、钢管构件微风振动

长细比较大的钢管构件，在风速较小时容易发生垂直于风向的横向振动，工程上称之为微风振动。这种持续反复的振动，可能会造成构件的螺栓松动或者连接板的疲劳破坏。

1. 微风振动机理

圆柱体的横向扰流会在主体后产生漩涡，漩涡的运动特性由圆柱体在风流中的雷诺数 Re 决定。当杆件的雷诺数 $40 < Re < 3\times10^5$ 时，杆件处于亚临界范围内，尾流中上面的气流向下挤，形成下窝，下面的气流向上挤，形成上窝，二者交替出现，又交替从注体上脱落，以略低于周围流体的速度向下移动。在柱体后面形成两列交替错开、旋向相反、间距保持不变、周期性脱落的漩涡，学术上称为卡门窝街，如图 8-115 所示。漩涡脱落主导频率的近似值计算公式为

$$f = 0.2 \times \frac{V}{d} \tag{8-193}$$

式中　d——圆柱体的直径；

V——风速；

0.2——圆柱体的斯脱罗哈系数。

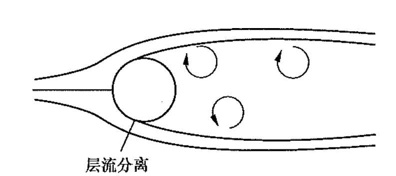


图 8-115　卡门窝街示意图

漩涡脱落产生的脱落风力，会使得柱体产生横向风运动。当漩涡脱落的主导频率与圆柱体的某阶固有频率比较接近时，就会发生涡激共振。涡激共振具有频率锁定的特性，增加了共振发生的频率。从另一方面来说，也可以借助涡激共振频率的特性来减弱甚至防止其发生。

2. 等直径钢管起振临界风速

等直径钢管微风振动的起振临界风速 v_{cr}，可按照下式计算，即

$$v_{cr}=11530\frac{\lambda_n^2}{\lambda^2} \qquad (8\text{-}194)$$

式中 λ ——钢管杆件的长细比；

λ_n ——自振频率参数，依钢管杆件的振动阶次与杆端的约束条件而定（对于一阶振动，杆件的两端固接时取 4.73，一端固接一端铰接时取 3.927，两端铰接时取 3.142，悬臂时取 1.875）。

不同连接节点对应的杆端约束条件，可按如下原则确定：

（1）I 型、T 型、U 型、槽型插板连接：杆件沿螺栓轴线方向振动时可取铰接约束，垂直螺栓轴线方向振动时可取固接约束；

（2）十字型插板连接、法兰连接：取一端固接一端铰接约束；

（3）相贯焊连接：取固接约束。

3. 设计中的微风振动预防措施

工程设计中一般通过控制钢管构件的长细比来控制钢管起振临界风速，特高压工程设计一般要求水平钢管斜材长细比不大于 140，其他钢管斜材长细比不大于 160。对于地势空旷，植被稀少，持续风速较大的草原、沙漠及河床等地区，更容易引起钢管构件的微风振动，此类地区的工程设计时，可适当减少钢管构件的允许长细比。

4. 运行中的微风振动治理措施

对于已经建成的钢管塔，考虑加工、施工及运行等综合因素，可采用在发生微风振动的杆件上增加带短肋的开口套筒或缠绕螺旋形扰流线，通过改变圆柱体的表面形状和粗糙度，抑制产生横向扰流漩涡的风场，从而避免或减弱杆件微风振动状况；亦可通过增加拉索，一端固定在塔身主材上，另一端锁定在被约束钢管中部，通过约束钢管在水平风向垂直平面的变形，阻止振动的发生。

（1）在发生微风振动的杆件上增加带短肋的开口套筒（见图 8-116），套筒的尺寸及套筒上的短肋焊板的数量及尺寸可根据实际情况做调整。

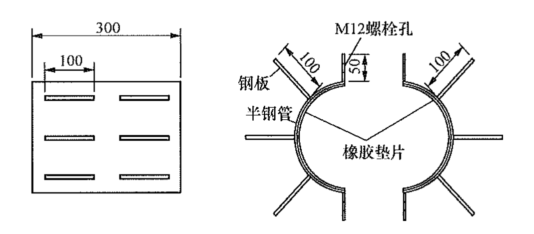


图 8-116　开口套筒示意图

套筒之间的安装距离可采用 1000～2000mm，单根杆件安装个数可以根据现场实验效果酌情增减，套筒安装示意图如图 8-117 所示。

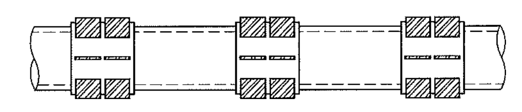


图 8-117　套筒安装示意图

（2）在构件表面缠绕扰流线，如图 8-118 所示，扰流线的直径一般取钢管直径的 1/10 左右，螺距取钢管直径的 4～12 倍。

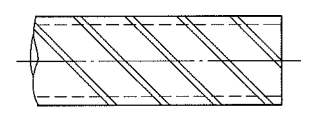


图 8-118　螺旋形扰流线

第九节　连接及构造

一、材料及其强度设计值

（一）连接材料

（1）螺栓连接：螺栓连接宜采用 4.8 级、6.8 级、8.8 级热浸镀锌螺栓，有条件时也可使用 10.9 级螺栓，其材质和机械特性应分别符合现行规范 GB/T 3098.1《紧固件机械性能螺栓、螺钉和螺柱》、GB/T 3098.2《紧固件机械性能　螺母　粗牙螺纹》和 DL/T 284《输电线路杆塔及电力金具用热浸镀锌螺栓与螺母》的规定。

（2）焊接：对手工焊焊条，当焊接 Q235 钢构件时，宜采用 E43 型焊条；当焊接 Q345 钢构件时，宜采用 E50 型焊条；当焊接 Q420 钢构件时，宜采用 E55 型焊条。对手工焊焊条应符合现行 GB/T 5117《非合金钢及细晶粒钢焊条》和 GB/T 5118《热强钢焊条》的规定，并宜优先采用低氢型焊条。

对自动焊和半自动焊应采用与主体金属强度相适应的焊丝和焊剂，应保证熔敷金属抗拉强度不低于相应手工焊焊条的数值。不同强度的钢材相焊接时，可按强度较低的钢材选用焊接材料。焊丝应符合现行 GB 50661《钢结构焊接规范》规定的要求。

（二）连接材料

钢材的孔壁承压强度设计值见表 8-53，螺栓和锚栓的强度设计值见表 8-69，焊缝的强度设计值见表 8-70。

表 8-69 螺栓和锚栓的强度设计值 N/mm²

材料		厚度或直径/mm	抗拉	抗剪	孔壁承压*	
镀锌粗制螺栓（C 级）	4.8 级	标称直径 d≤39	200	170	螺杆承压	420
	5.8 级	标称直径 d≤39	240	210		520
	6.8 级	标称直径 d≤39	300	240		600
	8.8 级	标称直径 d≤39	400	300		800
	10.9 级	标称直径 d≤39	500	380		900
锚栓	4.6 级	外径≥16	160	—	—	
	5.6 级	外径≥16	200	—	—	
	8.8 级	外径≥16	310	—	—	

注 8.8 级、10.9 级螺栓应具有 A 类（塑性性能）和 B 类（强度）试验项目的合格证明。

* 适用于构件上螺栓端距大于等于 1.5d（d 螺栓直径）。

表 8-70 焊 缝 的 强 度 设 计 值 N/mm²

焊接方法和焊条型号	构件钢材		对接焊缝				角焊缝
	牌号	厚度或直径（mm）	抗压 f_c^w	焊缝质量为下列等级时，抗拉 f_t^w		抗剪 f_v^w	抗拉、抗压和抗剪 f_f^w
				一级、二级	三级		
自动焊、半自动焊和 E43 型焊条的手工焊	Q235 钢	≤16	215	215	185	125	160
		＞16～40	205	205	175	120	
		＞40～60	200	200	170	115	
		＞60～100	190	190	160	110	
自动焊、半自动焊和 E50 型焊条的手工焊	Q345 钢	≤16	310	310	265	180	200
		＞16～35	295	295	250	170	
		＞35～50	265	265	225	155	
		＞50～100	250	250	210	145	
自动焊、半自动焊和 E55 型焊条的手工焊	Q390 钢	≤16	350	350	300	205	220
		＞16～35	335	335	285	190	
		＞35～50	315	315	270	180	
		＞50～100	295	295	250	170	
	Q420 钢	≤16	380	380	320	220	220
		＞16～35	360	360	305	210	
		＞35～50	340	340	290	195	
		＞50～100	325	325	275	185	

注 1. 自动焊和半自动焊所采用的焊丝和焊剂，应保证其熔敷金属的力学性能不低于现行 GB/T 5293《埋弧焊用碳钢焊丝和焊剂》和 GB/T 12470《低合金钢埋弧焊用焊剂》中相关的规定。

2. 焊缝质量等级应符合现行国家标准 GB 50205《钢结构工程施工质量验收规范》的规定。其中厚度小于 8mm 钢材的对接焊缝，不应采用超声波探伤确定焊缝质量等级。

3. 对接焊缝在受压区的抗弯强度设计值取 f_c^w，在受拉区的抗弯强度设计值取 f_t^w。

4. 表中厚度系指计算点的钢材厚度，对轴心受拉和受压构件系指截面中较厚板件的厚度。

二、螺栓连接计算

（一）普通螺栓的承载力设计值

在普通螺栓和锚栓的连接中，一个普通螺栓和锚栓的承载力设计值，应按表 8-71 所列公式计算。

表 8-71　　一个普通螺栓和锚栓的承载力设计值计算公式

项次	受力情况		普通螺栓（锚栓）承载力设计值		说明
1	受剪连接	螺栓抗剪	$N_v^b = n_v \dfrac{\pi d^2}{4} f_v^b$　（8-195）	取两者中的最小值	n_v 为承剪面数目，单剪 n_v=1，双剪 n_v=2，四剪 n_v=4； d、d_e 为普通螺栓或锚栓螺栓杆直径和在螺纹处的有效直径，见表 8-72，mm； $\sum t$ 为在同一受力方向的承压构件的较小总厚度，mm； N_v^b、N_c^b、N_t^b 分别为每个螺栓的承剪、承压、受拉承载力设计值，N； f_v^b、f_c^b 分别为螺栓的抗剪和构件的承压强度设计值，N/mm²； f_t^b、f_t^a 分别为螺栓、锚栓的抗拉强度设计值，N/mm²； N_t^a 为每个锚栓承载力设计值，N； N_v、N_t 分别为每个螺栓所承受的剪力和拉力设计值，N
2		螺栓承压	$N_c^b = d\sum t f_c^b$　（8-196）		
3	杆轴方向受拉的连接	螺栓受拉	$N_t^b = \dfrac{\pi d_e^2}{4} f_t^b$　（8-197）		
		锚栓受拉	$N_t^a = \dfrac{\pi d_e^2}{4} f_t^a$　（8-198）		
4	螺栓同时承受剪力和杆轴方向拉力的连接		$\sqrt{\left(\dfrac{N_v}{N_v^b}\right)^2 + \left(\dfrac{N_t}{N_t^b}\right)^2} \leqslant 1$　（8-199） $N_v \leqslant N_c^b$　（8-200）		

表 8-72　　螺栓的有效直径和螺纹处的有效面积

螺栓直径 d（mm）	螺纹间距 P（mm）	螺栓有效直径 d_e（mm）	螺栓有效面积 A_e（mm²）	螺栓直径 d（mm）	螺纹间距 P（mm）	螺栓有效直径 d_e（mm）	螺栓有效面积 A_e（mm²）
10	1.50	8.59	58	36	4.0	32.25	817
12	1.75	10.36	84	39	4.0	35.25	976
16	2.00	14.12	157	42	4.5	37.78	1121
18	2.50	15.65	192	45	4.5	40.78	1306
20	2.50	17.65	245	48	5.0	43.31	1473
22	2.50	19.65	303	52	5.0	47.31	1758
24	3.00	21.19	353	56	5.5	50.84	2030
27	3.00	24.19	459	60	5.5	54.84	2362
30	3.50	26.72	561	64	6.0	58.37	2676
33	3.50	29.72	694				

注　1. 表中 d_e 为螺栓或锚栓在螺纹处的有效直径，按下式计算得

$$d_e = \left(d - \frac{13}{24}\sqrt{3}P\right)，\text{mm}$$

A_e 为螺纹处的有效面积 $A_e = \dfrac{\pi}{4} d_e^2$，mm²。

2. 本表摘自《钢结构设计手册（第三版）》中国建筑工业出版社，2004。

（二）承受轴心力的连接所需的螺栓数目

（1）承受轴心力的连接所需的螺栓数目按式（8-201）和式（8-202）计算。

抗剪连接

$$n \geqslant \frac{N}{N_{min}} \text{或} n \geqslant \frac{T}{N_{min}} \quad (8\text{-}201)$$

抗拉连接

$$n \geqslant \frac{N}{N_{tmin}} \quad (8\text{-}202)$$

式中　n ——传递压力设计值 N 或拉力设计值 T 所需的螺栓数；

N_{min} ——按式（8-195）和式（8-196）计算的每

个螺栓容许承载力设计值较小值，N；

N_{tmin} ——按式（8-197）或式（8-198）计算的每个螺栓或锚栓的受拉承载力设计值，N。

（2）在构件的节点处或拼接接头的一端，当螺栓沿轴向受力方向的连接长度 l_1 大于 $15d_0$ 时，应将螺栓的承载力设计值乘以折减系数（$1.1-l_1/150d_0$）。当 l_1 大于 $60d_0$ 时，应将螺栓的承载力设计值乘以折减系数0.7，d_0 为孔径。

（三）在偏心力作用下螺栓群的受力计算

当连接构件承受弯矩或者节点上被连接构件的合力作用线不通过螺栓群的形心 M 时，连接将承受弯矩（见图 8-119），此时由弯矩引起的螺栓受力 F_i' 为

$$F_i'=\frac{e_i}{\sum e_i^2}M=\frac{e_i}{\sum e_i^2}F_0e \tag{8-203}$$

由合力 F_0 引起的螺栓受力 F_i'' 为

$$F_i''=\frac{F_0}{n} \tag{8-204}$$

一个螺栓总的受力 F_i 为

$$F_i=\sqrt{(F_i')^2+(F_i'')^2}\leqslant N_{min} \tag{8-205}$$

式中 e_i ——螺栓到螺栓群形心距离（i=1，2，…），mm；

F_0 ——被连接构件在连接轴线方向的合力设计值，N；

e ——F_0 与连接轴线之间的偏心距（见图8-119），mm；

n ——连接螺栓数；

N_{min} ——按式（8-195）和式（8-196）计算的每个螺栓容许承载力设计值较小值，N。

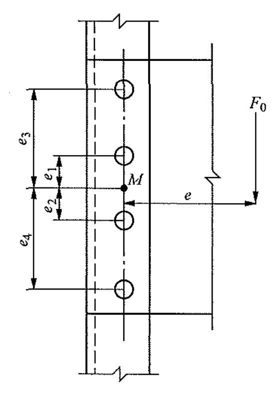


图 8-119 承受偏心力的连接

（四）螺栓的排列和构造要求

（1）螺栓的排列考虑受力、构造和施工要求，其最大和最小间距应符合表 8-73 规定的要求。

表 8-73 螺栓的容许间距

名 称	位置和方向			最大容许距离（取两者的较小值）	最小容许距离
中心间距	任意方向	外排		8d 或 12t	2.5d
		中间排	构件受压力	12d 或 18t	
			构件受拉力	16d 或 24t	
中心至构件边缘距离	顺内力方向			4d 或 8t	1.5d
	垂直内力方向	切割边			1.45d
		轧制边	高强度螺栓		
			普通螺栓		1.25d

注 1. d 为螺栓直径，t 为外层较薄板的厚度。
2. 高强度螺栓是指 8.8 级以上等级螺栓。
3. 受剪螺栓孔的直径可比螺栓直径大 1.5mm，有特殊要求时可仅大 1.0mm。

（2）接头包角钢每端的连接螺栓主材不应少于 6 个，斜材不应少于 4 个，且接头应靠近节点。

（3）用于连接受力构件的螺栓，其直径不宜小于16mm。

三、焊缝连接计算

（一）焊缝连接受力计算

（1）对接焊缝应按下列规定计算：

1）在对接接头和 T 型接头中，垂直于轴心拉力或轴心压力的对接焊缝，其强度应按下式计算：

$$\sigma=\frac{N}{L_w t}\leqslant f_t^w \text{ 或 } f_c^w \tag{8-206}$$

式中 N ——与焊缝垂直的拉力或压力，N；

L_w ——焊缝的计算长度，mm；

t ——在对接接头中为连接件的较小厚度；在T 型接头中为腹板的厚度，mm；

f_t^w、f_c^w ——对接焊缝的抗拉、抗压强度设计值，N/mm²。

2）在对接接头和 T 型接头中，与力平行的对接焊缝，其强度应按下式计算：

$$\tau=\frac{V}{L_w t}\leqslant f_v^w \qquad (8\text{-}207)$$

式中 V ——与焊缝平行的剪力，N；

f_v^w ——对接焊缝的抗剪强度设计值，N/mm²。

3）在对接接头和 T 型接头中，承受弯矩和剪力共同作用的对接焊缝，其正应力和剪应力应分别进行计算。但在同时受有较大正应力和剪应力处，应按下式计算折算应力，即

$$\sqrt{\sigma^2+3\tau^2}\leqslant 1.1f_t^w \qquad (8\text{-}208)$$

式中 σ ——正应力，N/mm²；

τ ——剪应力，N/mm²。

注意：①当承受轴心力的板件用斜焊缝对接，焊缝与作用力间的夹角θ符合 $\tan\theta\leqslant 1.5$ 时，其强度可不计算。②当对接焊缝无法采用引弧板和引出板施焊时，每条焊缝的长度计算时应各减去 $2t$。

（2）直角角焊缝的强度应按下列公式计算：

直角角焊缝截面如图 8-120 所示。

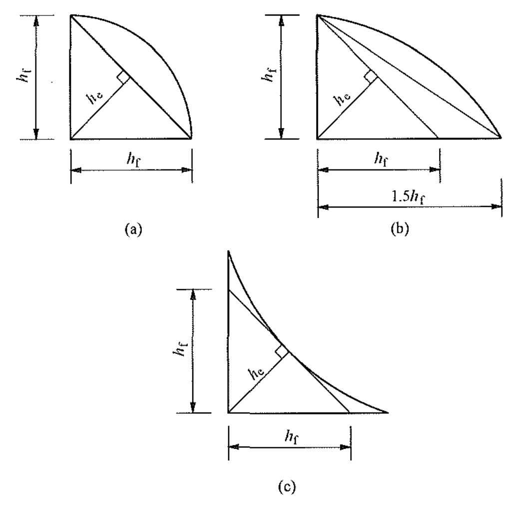


图 8-120 直角角焊缝截面

1）在通过焊缝形心的拉力、压力或剪力作用下：

当作用力垂直于焊缝长度方向时

$$\sigma_f=\frac{N}{h_e L_w}\leqslant \beta_f f_f^w \qquad (8\text{-}209)$$

当作用力平行于焊缝长度方向时

$$\tau_f=\frac{N}{h_e L_w}\leqslant f_f^w \qquad (8\text{-}210)$$

2）σ_f和τ_f共同作用处：

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_f}{\beta_f}\right)^2+\tau_f^2}\leqslant f_f^w \qquad (8\text{-}211)$$

式中 σ_f ——按焊缝有效截面（$h_e L_w$）计算，垂直于焊缝长度方向的应力，N/mm²；

τ_f ——按焊缝有效截面计算，沿焊缝长度方向的剪应力，N/mm²；

h_e ——角焊缝的有效厚度，mm，对直角角焊缝等于 $0.7h_f$，h_f为较小焊脚尺寸；

L_w ——角焊缝的计算长度，mm，对每条焊缝取其实际长度减去 2 倍 h_f且不小于 10 mm；

f_f^w ——角焊缝的强度设计值，N/mm²；

β_f ——正面角焊缝的强度设计值增大系数：对承受静力荷载和间接承受动力荷载的结构，$\beta_f=1.22$；对直接承受动力荷载的结构，$\beta_f=1.0$。

（3）两焊脚边夹角α为$60°\leqslant\alpha\leqslant 135°$的T型接头，其斜角角焊缝（见图 8-121、图 8-122）的强度应按式（8-209）～式（8-211）计算，但取 $\beta_f=1.0$，其计算厚度为：$h_e=h_f\cos\frac{\alpha}{2}$（根部间隙 b、b_1 或 $b_2\leqslant$ 1.5mm）或 $h_e=\left[h_f-\frac{b(\text{或}b_1、b_2)}{\sin\alpha}\right]\cos\frac{\alpha}{2}$（$b$、$b_1$ 或 $b_2>$ 1.5mm 但≤5mm）。

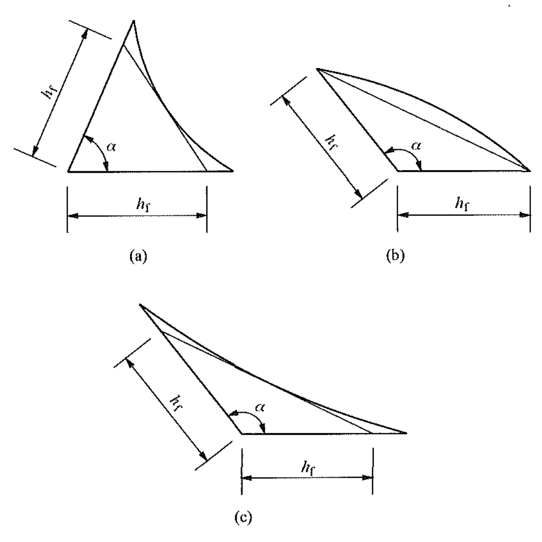


图 8-121 T 型接头斜角角焊缝截面

（4）角钢与钢板连接的角焊缝，应按表 8-74 所列公式计算，角钢肢背、肢尖的焊缝受力分配按表 8-75 所示。

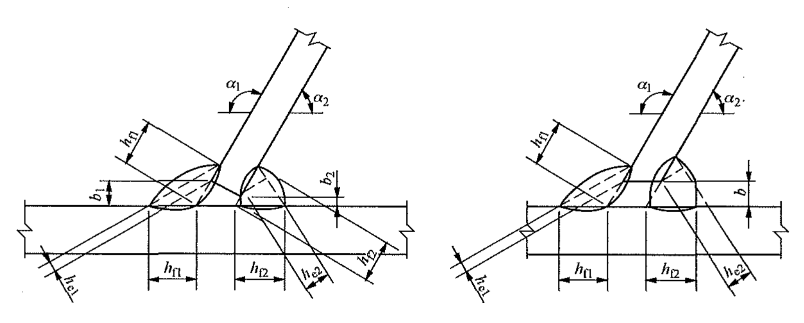


图 8-122 T 型接头的根部间隙和焊缝截面

表 8-74 **角钢与钢板的角焊缝计算公式**

项次	连接形式	公式	说明
1	(a) 两面侧焊	$l_{w1}=\dfrac{k_1 N}{2\times0.7h_f f_f^w}$ (8-212) $l_{w2}=\dfrac{k_2 N}{2\times0.7h_f f_f^w}$ (8-213)	假定侧面角焊缝的焊脚尺寸 h_f 为已知，求焊缝计算长度 l_w，焊缝计算长度为设计长度减 $2h_f$
2	(b) 三面围焊	$\left.\begin{array}{l} N_3=2\times0.7h_{f3}l_{w3}\beta_f f_f^w \\ 但须N_3<2k_2N \\ N_1=k_1N-N_3/2 \\ N_2=k_2N-N_3/2 \\ l_{w1}=\dfrac{N_1}{2\times0.7h_{f1}f_f^w} \\ l_{w2}=\dfrac{N_2}{2\times0.7h_{f2}f_f^w} \end{array}\right\}$ (8-214)	假定正面角焊缝的焊脚尺寸为 h_{f3} 和长度 l_{w3} 为已知，侧面角焊缝的焊脚尺寸 h_{f1}、h_{f2} 为已知，求焊缝计算长度 l_{w1}、l_{w2}
3	(c) L型围焊	$\left.\begin{array}{l} N_3=2k_2N \\ l_{w1}=\dfrac{N-N_3}{2\times0.7h_{f1}f_f^w} \\ l_{w3}=\dfrac{N_3}{2\times0.7h_{f3}f_f^w} \end{array}\right\}$ (8-215)	L 型围焊一般只宜用于内力较小的杆件连接，且使 $l_{w1}\geqslant l_{w3}$
4	(d) 单角钢的单面连接型式(一)	$\left.\begin{array}{l} l_{w1}=\dfrac{k_1N}{0.7h_{f1}\left(0.85f_f^w\right)} \\ l_{w2}=\dfrac{k_2N}{0.7h_{f2}\left(0.85f_f^w\right)} \end{array}\right\}$ (8-216)	角钢杆件的单面连接，只宜用于内力较小的情况，式中的 0.85 为焊缝强度折减系数，见 GB 50017—2003《钢结构设计规范》3.4.2
5	(e) 单角钢的单面连接型式(二)	$l_{w1}+l_{w2}=\dfrac{N}{0.7h_{f1}\left(0.85f_f^w\right)}$ $l_{w1}=\dfrac{b}{B}(l_{w1}+l_{w2})+2h_{f1}$ (8-217) $l_{w2}=\dfrac{a}{B}(l_{w1}+l_{w2})+2h_{f2}$	

注 1. h_{f1}、l_{w1} ——一个角钢肢背侧面角焊缝的焊脚尺寸和计算长度；
h_{f2}、l_{w2} ——一个角钢肢尖侧面角焊缝的焊脚尺寸和计算长度；
h_{f3}、l_{w3} ——一个角钢端部正面角焊缝的焊脚尺寸和计算长度；
k_1、k_2 ——角钢肢背和肢尖的角焊缝内力分配系数，可按表 8-75 确定。

2. 本表摘自《钢结构设计手册（第三版）》中国建筑工业出版社，2004。

表 8-75　　角钢肢背和肢尖的角焊缝内力分配系数 k_1 和 k_2 值

项次	角钢类别与连接形式	分配系数	
		k_1	k_2
1	等边角钢一肢相连	0.70	0.30
2	不等边角钢短肢相连	0.75	0.25
3	不等边角钢长肢相连	0.65	0.35

注　本表摘自《钢结构设计手册（第三版）》，中国建筑工业出版社，2004。

（二）构造要求

（1）焊缝应根据结构的重要性、荷载特性、焊缝形式以及应力状态等情况，按下述原则选用不同的质量等级：

1）凡要求与母材等强度的对接焊缝应全焊透，其质量等级当受拉时应不低于二级，受压时宜为二级；

2）对于受力角焊缝或者部分焊透的对接与角接组合焊缝，其外观质量标准应符合二级；

3）不要求焊透的纵向对接焊缝和其他构造焊缝，其质量等级可为三级。

（2）焊接材料的强度级别应与主体钢材级别相适应，当不同强度级别的钢材连接时，可按强度低的钢材选择焊接材料。

（3）对于焊接T字接头、十字接头和角接接头中的较厚板材，应采取防止层状撕裂的措施。

（4）焊缝的坡口形式应根据焊件尺寸和加工条件按现行有关标准的要求确定。

（5）对于厚度大于或等于25mm的焊接件，应按有关规定采用焊前预热和焊后保温的措施消除相应的焊接应力和变形。

（6）焊缝的布置应避免立体交叉和集中在一处。焊缝高度不应任意加大，角焊缝的尺寸应符合下列要求：

1）角焊缝的焊脚尺寸 h_f 不应小于 $1.5\sqrt{t}$，t 为较厚焊件的厚度，并不应大于较薄焊件厚度的1.2倍。自动焊的角焊缝最小焊脚尺寸可减小1mm，T形连接的单面角焊缝应增加1mm。当焊件厚度不大于4mm时，最小焊脚尺寸可取与焊件厚度相同。

2）焊件边缘的角焊缝最大焊脚尺寸，当焊件厚度 $t \leqslant 6$mm时，取 $h_f \leqslant t$；当焊件厚度 $t > 6$mm时取 $h_f \leqslant t-(1\sim2)$ mm。

3）侧面角焊缝或正面角焊缝的计算长度不得小于 $8h_f$ 和40mm；侧面角焊缝的计算长度不宜大于 $60h_f$，当大于上述数值时，其超过部分在计算中不予考虑，若内力沿侧面角焊缝全长分布，则计算长度不受此限制。

（7）杆件与节点板的连接焊缝，一般宜采用两面侧焊，也可用三面围焊，对角钢杆件可采用L形围焊，节点板焊在杆件上，一般采用三面围焊，所有围焊的转角处，必须连续施焊，其余的面应用薄焊缝封焊。

四、节点板连接计算

（1）连接节点板的强度除应满足螺栓孔壁承压力要求外，还应按下式计算：

$$\sigma = \frac{N}{b_e t} \leqslant f \qquad (8\text{-}218)$$

式中　N ——作用于板件的拉力或压力，N；

b_e ——板件的有效宽度；当用螺栓连接时，应减去孔径，mm；

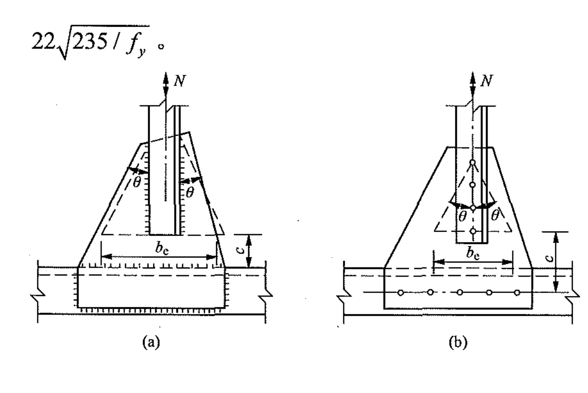
t ——板件厚度，mm。

板件的有效宽度如图8-123所示。

（2）连接节点板在斜腹杆压力作用下的稳定性可用下列方法进行计算：

1）对有竖腹杆相连的节点板，当 $c/t \leqslant 15\sqrt{235/f_y}$ 时（c 为受压杆连接肢端面中点沿腹杆轴线方向至弦杆的净距离），可不计算稳定。否则，应参考GB 50017—2003《钢结构设计规范》的附录F进行稳定计算。但在任何情况下，c/t 均不得大于

$22\sqrt{235/f_y}$。



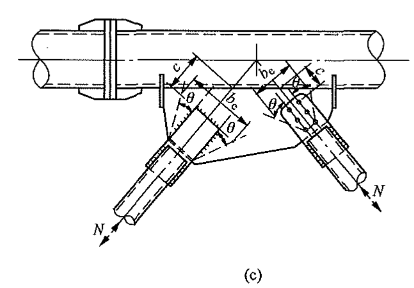


图 8-123 板件的有效宽度

注：θ 为应力扩散角，可取 30°（多排螺可适当降低扩散角）。

2）对无竖腹杆相连的节点板，当 $c/t \leqslant 10\sqrt{235/f_y}$ 时，节点板的稳定承载力可取为 $0.8b_etf$。当 $c/t > 10\sqrt{235/f_y}$ 时，应参考 GB 50017—2003《钢结构设计规范》的附录 F 进行稳定计算，但在任何情况下，c/t 均不得大于 $17.5\sqrt{235/f_y}$。

（3）当用上述方法计算节点板时，尚应满足下列要求：

1）节点板边缘与腹杆轴线之间的夹角不应小于 15°；

2）斜腹杆与弦杆的夹角应在 30°～60° 之间；

3）节点板的自由长度 l_f 与厚度 t 之比不得大于 $60\sqrt{235/f_y}$，否则应将节点板沿板长方向卷边（或增设加劲板），以增加节点板刚度。

五、受拉构件块剪计算

对于受拉构件，在被连接肢上螺栓群图形的中心线（如图 8-124 所示），超出了角钢形心线时，应按以下方法作块剪（也叫破裂）校核。

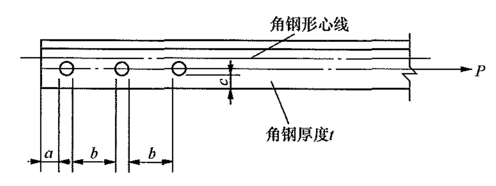


图 8-124 块剪（破裂）的确定

$$\left.\begin{aligned} N &= A_v f_v + A_t f \\ A_v &= t(a+2b) \\ A_t &= tc \end{aligned}\right\} \tag{8-219}$$

式中 f_v——钢材的抗剪强度设计值，N/mm²；

f——钢材的抗拉强度设计值，N/mm²；

t——角钢肢厚度，mm。

六、组合角构件

（一）组合角钢填板计算

由二个或四个等边角钢组合而成的断面型式，如图 8-125 所示。

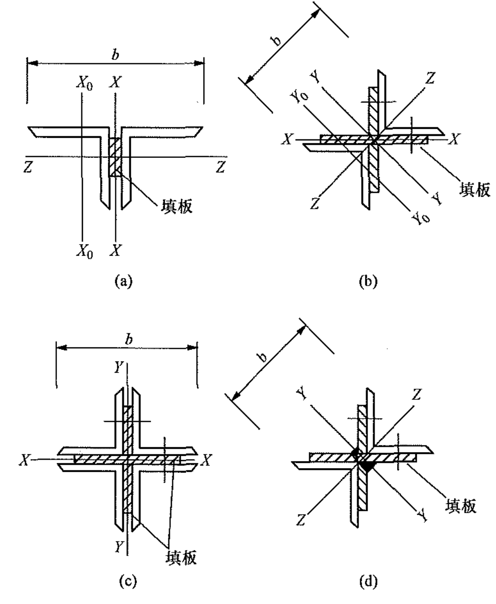


图 8-125 常用角钢组合断面型式

（1）填板或螺栓承受的剪力可按如下方法计算：

$$V_s = \frac{2f \times (1-\varphi) \times S}{b} \times \left[\sin\left(\frac{3\pi}{2n}\right) - \sin\left(\frac{\pi}{2n}\right)\right] \tag{8-220}$$

式中 f——钢材抗压强度设计值，N/mm²；

φ——组合角钢对应虚轴的压屈稳定系数；

"┐ ┌"字断面：对应于图 8-125（a）X-X 轴回转半径；

"┐ └"字断面：对应于图 8-125（b）Y-Y 轴回转半径；

"╬"字断面：对应于图 8-125（c）X-X 轴和 Y-Y 轴回转半径相同；

b——组合断面边缘屈服的宽度；

n——构件计算长度 l 的等分数；

S——组合断面中和轴处半个断面绕虚轴的面积矩 mm³。

┐└组成的十字断面，当填板在一个等分点上两

个方向布置组成一对时，则一块填板的纵向剪力 V_s 为式（8-220）乘以 0.5；

图 8-125（a）所示，填板本身不需要计算，只需对连接螺栓进行计算；

图 8-125（b）所示，十字断面的填板和螺栓（焊缝）均要计算；绕 $Y—Y$ 虚轴屈曲时，挠曲产生的纵向剪力 V_s 通过填板对螺栓群产生扭矩；

图 8-125（c）所示，填板本身不需要计算，只需对 $X–X$ 或 $Y–Y$ 一个方向的连接螺栓进行计算。

S 的计算如下：

“┐ ┌” 字和 “╬” 字断面：

$$S=\frac{A}{2}\times(z_0+t/2) \qquad (8\text{-}221)$$

“┐ └” 字断面：

$$S=\frac{A}{2}\times(z_0+t/2)\times\sqrt{2} \qquad (8\text{-}222)$$

式中 z_0——组合构件的重心距离，mm；

A——整个断面的毛面积，mm²；

t——填板厚度。

“┐ ┌” 字和 “╬” 字断面示意图如图 8-126 所示。

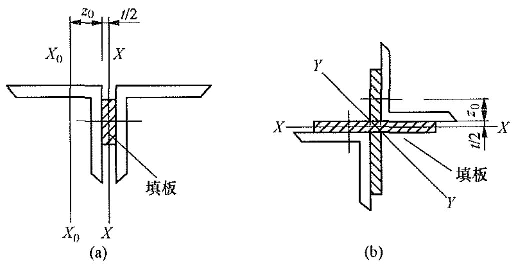


图 8-126 “┐ ┌” 字和 “╬” 字断面示意图

（a）┐ ┌字断面；（b）╬字断面

（2）组合断面的连续杆件，如图 8-127 所示，纵向剪力为

$$V_s=\frac{2f\times(1-\varphi)\times S}{b}\times\sin\left(\frac{\pi}{2n}\right) \qquad (8\text{-}223)$$

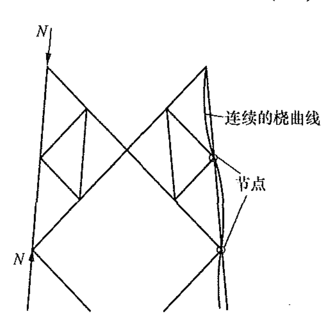


图 8-127 组合断面连续杆件示意图

（3）“┐ └” 字断面螺栓计算如下：

$$M_V=V_s b_2 \qquad (8\text{-}224)$$

式中 M_V——螺栓群承受的扭矩，N·mm；

b_2——螺栓群中心到填板中心的距离，mm。

$$V_{max}=\sqrt{(V_1^2+V_2^2)}\leqslant\frac{\pi}{4}d^2 f_v^b \qquad (8\text{-}225)$$

$$V_2=M_V\cdot y_{max}\Bigg/\left(\sum_i^n x_i^2+\sum_i^n y_i^2\right) \qquad (8\text{-}226)$$

式中 V_{max}——离螺栓群形心最远一个螺栓所承受的全部剪力值，N；

V_1——每个螺栓平均承受的剪力值，$V_1=V_s/n$，N；

V_2——离螺栓群形心最远的螺栓在 X-X 轴方向承受的剪力值；

X_i——某个螺栓离螺栓形心在 Y-Y 轴方向的距离，mm；

Y_i——某个螺栓离螺栓形心在 X-X 轴方向的距离，mm。

（4）“┐ └” 字断面填板计算：

1）填板所受弯曲正应力为

$$\sigma=\frac{M_Q h_{max}}{I_{b1}}\leqslant f \qquad (8\text{-}227)$$

式中 I_{b1}——填板断面扣孔后的惯性矩，mm⁴；

h_{max}——距填板形心较远的高度，mm。

2）填板所受剪应力为

$$\tau=\frac{VS^*}{I_{b1}t_0}\leqslant f_v \qquad (8\text{-}228)$$

式中 S^*——填板扣孔后的半个断面对形心的面积矩，mm³；

t_0——填板的厚度，mm。

组合角钢填板计算简图如图 8-128 所示。

（二）组合角钢构造要求

（1）常用组合构件形式，如图 8-129 所示。

（2）组合构件应满足以下的构造要求：

用填板连接而成的组合构件，满足以下要求时，可按实腹式构件进行计算。

1）用填板连接而成的双角钢或双槽钢构件，填板间的距离 L_1 不应超过 $40r_i$（压杆）或 $80r_i$（拉杆）。

2）当组成如图 8-130（a）、（b）所示的双角钢或双槽钢截面时，r_i 为一个角钢或一个槽钢平行于填板的形心轴的回转半径；当组成如图 8-130（c）的十字形截面时，r_i 为一个角钢的最小回转半径；当组成如图 8-130（d）的四角钢十字形截面时，r_i 为组合构件的 $r_y=r_x$。

3）受压杆件的两个侧向支承点之间的填板数不得少于两个，且沿杆件长度均匀交错布置。

（3）四肢组合构件，宜用斜缀条形式，斜缀条与

构件轴线间的夹角，应在 40°～70° 范围。

（4）主材接头宜设置在节点处；单角钢变双角钢的接头，应避免产生偏心弯矩。

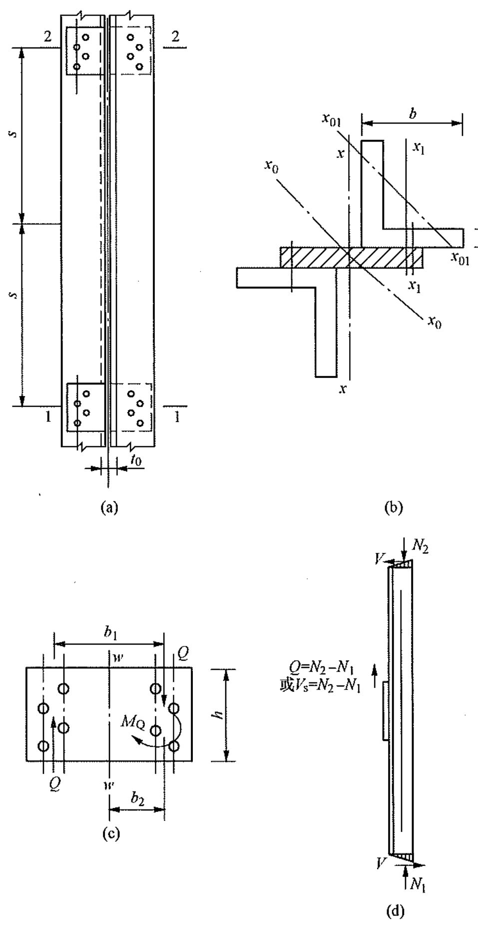
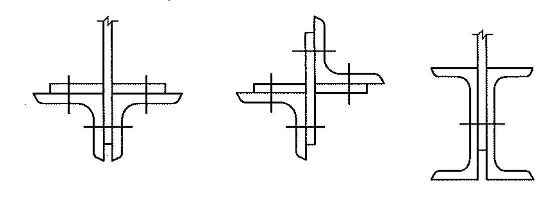


图 8-128 组合角钢填板计算简图



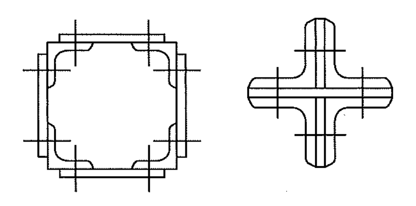


图 8-129 常用组合构件形式

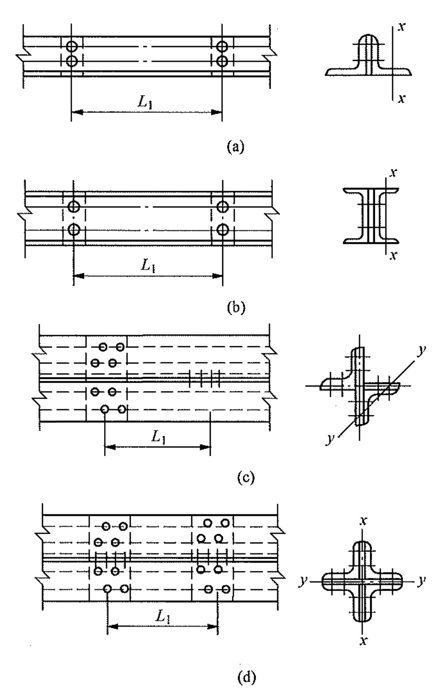


图 8-130 组合构件填板构造要求

七、插入角钢连接计算

（一）插入角钢连接

（1）插入角钢的强度应按下式计算：

$$A_n \geqslant \frac{N}{f} + \frac{V_s}{0.75f} \tag{8-229}$$

式中 A_n ——插入角钢的净截面面积，mm²；

N ——插入角钢承受的拉力或压力，N；

V_s ——垂直于插入角钢的剪力，N。

（2）角钢锚固件承载力应按下列公式计算（见图 8-131）：

$$\left.\begin{aligned} & x = t\sqrt{\frac{f}{1.19f_c}} \\ & V_P = 1.19 f_c L \times (t + r + x/2) \\ & n = N/P \\ & t + r + x \leqslant b \end{aligned}\right\} \tag{8-230}$$

式中 P ——单个角钢锚固件承受剪力承载力设计值，N；

x ——角钢锚固件上反力呈三角形分布长度，mm；

t ——角钢厚度，mm；

r ——角钢内圆弧的半径，mm；

f_c ——混凝土的轴心抗压强度设计值，N/mm²；

L ——角钢锚固件的长度，mm；

b ——角钢锚固件的肢宽，mm。

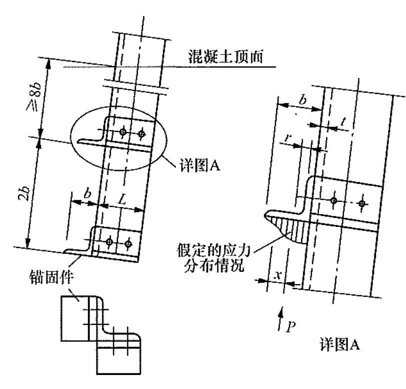


图 8-131　角钢锚固件受力简图

（3）螺杆锚固件承载力应按下列公式计算（见图 8-132）：

$$Q_n = 0.425A_s\sqrt{f_cE_c} \tag{8-231}$$

式中　Q_n——单个螺杆锚固件承受剪力的承载力设计值，N；

A_s——单个螺杆的截面积，mm²；

f_c——混凝土的轴心抗压强度设计值，N/mm²；

E_c——混凝土的弹性模量，N/mm²。

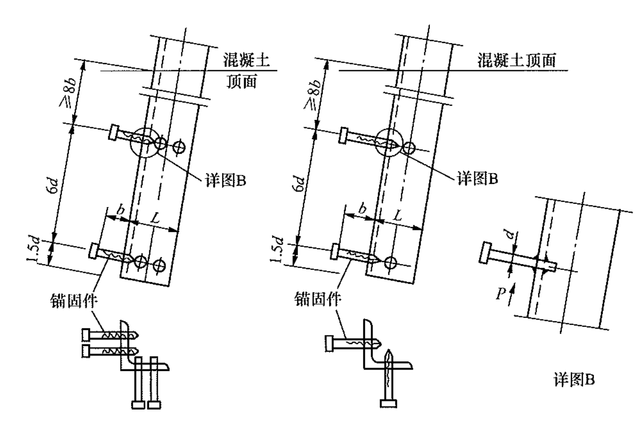


图 8-132　螺杆锚固件受力简图

注：1. 螺杆直径 $d\geqslant 16$mm；且不应大于连接材料厚度的 2.5 倍。

2. 锚固宽度 $b\geqslant 4d$。

3. 锚固件可用焊接，也可用螺栓连接

（4）插入角钢埋入混凝土的最小深度 h 应按下式计算，即

$$h\geqslant 12d\sqrt{\frac{f_u}{400}} \tag{8-232}$$

式中　d——插入角钢截面换算成相同截面圆钢的直径，mm；

f_u——钢材的最低抗拉强度标准值，N/mm²。

注意，插入角钢埋入混凝土的最小埋深还应满足构造要求。

（二）构造要求

（1）插入角钢材质、规格均不应低于塔腿主材；

（2）离地面最近的锚固件最小深度可取 $8b$（见图 8-131 和图 8-132)；

（3）当插入角钢未伸到基础底面时，需在插入角钢底端采取固定措施。

八、法兰连接计算

（一）有劲法兰连接

（1）有劲法兰受压、弯时，其受压边缘的力由管壁和法兰板之间的内外环连接焊缝传递，内外连接环焊缝承载能力之和不应小于管壁承载能力（见图 8-133）。法兰板受弯应由最大受拉螺栓所在区域控制，并按式（8-235）～式（8-237）计算确定。

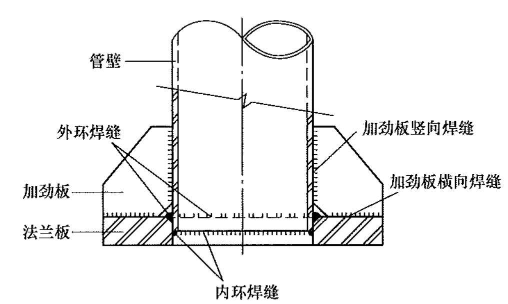


图 8-133　有劲法兰连接示意图

（2）有加劲法兰的螺栓，应按下列公式计算：

1）轴心受拉作用时：

$$N_{tmax}^b = N/n \leqslant N_t^b \tag{8-233}$$

式中　N_{tmax}^b——受力最大的一个螺栓的拉力，N；

N——法兰所受的拉力，N；

n——法兰盘上螺栓数目；

N_t^b——螺栓抗拉承载力设计值，N。

2）受拉（压）、弯共同作用时：

$$N_{tmax}^b = \frac{M \cdot Y_1}{\sum Y_i^2} \pm \frac{N}{n} \leqslant N_t^b \quad (8\text{-}234)$$

式中 M——法兰所受的弯矩，N·mm；

N——法兰所受的轴心作用力（压力时取用负值），N；

Y_i——螺栓中心到旋转轴的距离，mm；

当 $\frac{M}{|N|} \geqslant 0.8r_2$ 时，取管外径一半的 0.8 倍为旋转轴，参见图 8-134（a）；

当 $\frac{M}{|N|} < 0.8r_2$ 时，取管中心为旋转轴，参见图 8-134（b）；

Y_1——受力最大螺栓中心到旋转轴的距离，mm；

r_2——钢管外壁半径，mm。

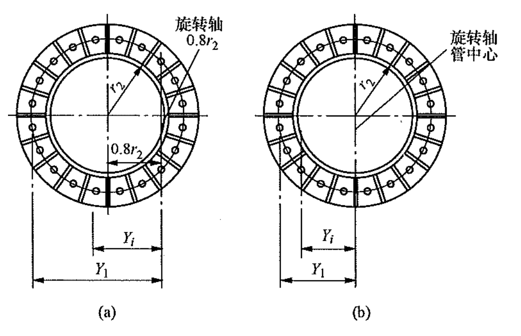


图 8-134 有加劲法兰螺栓受力简图

（3）有加劲法兰的法兰板，应按下列公式计算：

1）受力简图可按照三边支撑板确定（两边固定、一边简支，见图 8-135），板上均布荷载：

$$q = \frac{N_{tmax}^b}{L_x \cdot L_y}$$

$$L_y = \min(1.8L_{y1}, 2.2L_{y2}) \quad (8\text{-}235)$$

2）板中最大弯矩：

$$M_{max} = \beta \cdot q \cdot L_x^2 \quad (8\text{-}236)$$

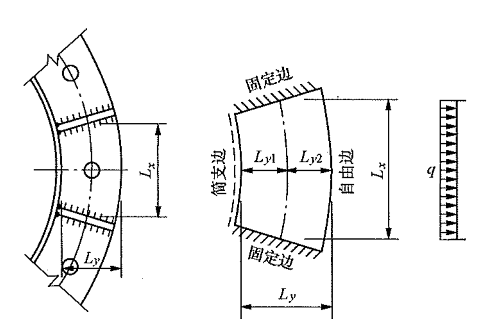


图 8-135 有加劲法兰板受力简图

弯矩系数β和加劲板反力比见表 8-76。

3）法兰板厚度为

$$t \geqslant \sqrt{\frac{5M_{max}}{f}} \quad (8\text{-}237)$$

式中 t——法兰板厚度，mm。

（4）有加劲法兰的加劲板，应按下列公式计算（见图 8-136）。

竖向对接焊缝：

$$\left.\begin{aligned} \tau_f &= \frac{\alpha N_{tmax}^b}{ht} \leqslant f_v^w \\ \sigma_f &= \frac{6 \times \alpha N_{tmax}^b e}{t(h - S_1 - 2t)^2} \leqslant f_t^w \\ &\sqrt{\sigma_f^2 + 3\tau_f^2} \leqslant 1.1 f_t^w \end{aligned}\right\} \quad (8\text{-}238)$$

表 8-76　　弯矩系数β和加劲板反力比

L_y/L_x	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85
β	0.0785	0.0834	0.0874	0.0895	0.0900	0.0901	0.0900	0.0897	0.0892	0.0884	0.0872
α	0.67	0.71	0.73	0.74	0.76	0.79	0.80	0.80	0.81	0.82	0.83
L_y/L_x	0.90	0.95	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50	1.75	2.0	>2.0
β	0.0860	0.0848	0.0843	0.0840	0.0838	0.0836	0.0835	0.0834	0.0833	0.0833	0.0833
α	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88	0.89	0.90	0.91	0.92	1.0

注 1. L_y 为固结边长度，L_x 为简支边长度（见图 8-135），实际取扇形区域的平均宽度。

2. 加劲板受力 $P = \alpha N_{tmax}^b$。

水平对接焊缝：$\sigma_f = \dfrac{\alpha N_{tmax}^b}{t(B - S_2 - 2t)} \leqslant f_t^w$ （8-239）

式中 σ_f——垂直于焊缝长度方向的拉应力，N/mm²；

τ_f——平行于焊缝长度方向的剪应力，N/mm²；

B——加劲板宽度，mm；

t——加劲板厚度，mm；

e——N_{tmax} 偏心距，mm；

α ——加劲板承担反力的比例，可按表 8-76 确定，加劲板受力为 $P=\alpha N_{tmax}^{b}$；

h ——加劲板高度，mm；

S_1 ——加劲板下端切角高度，mm；

S_2 ——加劲板下端横向切角尺寸，mm；

f_v^w、f_t^w ——对接焊缝抗剪、抗拉强度设计值，N/mm^2。

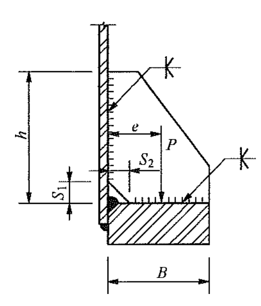


图 8-136　加劲板计算简图

（二）无劲法兰连接

（1）无加劲法兰的螺栓，应按下列公式计算（见图 8-137）：

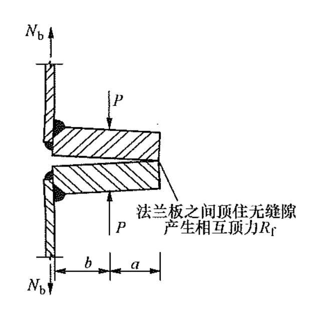


图 8-137　无劲法兰螺栓受力简图

1）轴心受拉作用时：

一个螺栓所对应的管壁段中的拉力：

$$N_b=N/n \tag{8-240}$$

受力最大的一个螺栓的拉力：

$$N_{tmax}^{b}=m\cdot N_b\cdot\frac{a+b}{a}\leqslant N_t^b \tag{8-241}$$

式中　m——法兰盘螺栓受力修正系数，m=0.65。

2）受拉（压）、弯共同作用时，一个螺栓所对应的管壁段中的拉力

$$N_b=\frac{1}{n}\left(\frac{M}{0.5r_2}+N\right) \tag{8-242}$$

式中　M——法兰盘所受弯矩，N·mm；

N ——法兰盘所受轴心力，N，压力时取用负值。

（2）无加劲法兰的法兰板，应按下列公式计算（见图 8-138）：

顶力：
$$R_f=N_b\times\frac{b}{a} \tag{8-243}$$

剪应力：
$$\tau=1.5\times\frac{R_f}{t\cdot S}\leqslant f_v \tag{8-244}$$

正应力：
$$\sigma=\frac{5R_fe_0}{St^2}\leqslant f \tag{8-245}$$

式中　S——螺栓的间距，mm，S=（r_2+b）×θ；

R_f ——法兰板之间顶力，N；

θ ——两螺栓间的圆心角，rad。

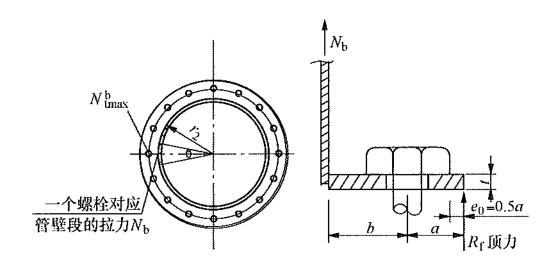


图 8-138　无加劲法兰板受力简图

（3）无劲法兰的焊缝，应按照 GB 50017《钢结构设计规范》中焊缝连接的相关计算要求进行设计，且应满足内外连接环焊缝承载能力之和不应小于管壁承载能力的原则。

（三）带颈法兰连接

（1）带颈对焊（见图 8-139）及平焊法兰（见图 8-140）轴心受拉时的螺栓计算公式为

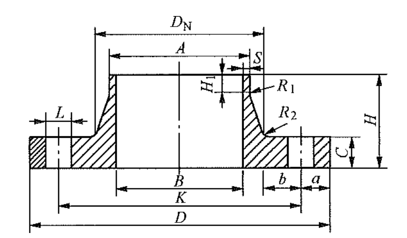


图 8-139　带颈对焊法兰

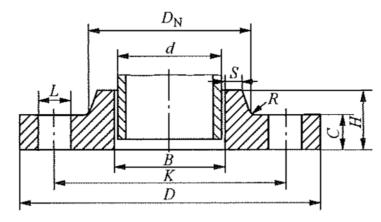


图 8-140　带颈平焊法兰

$$N_{tmax}^{b}=m\cdot N_b\cdot\frac{a+b}{a}\leqslant N_t^b \tag{8-246}$$

式中　m——法兰盘螺栓受力修正系数，m=0.62；

a ——螺栓孔中心到法兰边缘的距离，mm；

b ——螺栓孔中心到法兰颈根部的距离，mm。

当$0.62\times(a+b)/a$小于 1.1 时，取$0.62\times(a+b)/a$=1.1。

（2）法兰颈厚度（S）计算。

根据法兰的加工工艺及检测要求来确定法兰颈厚度的取值：

$$\left.\begin{array}{l}当d<711\text{mm}时：S=t+2\text{mm}\\ 当d\geqslant 711\text{mm}时：S=t+3\text{mm}\end{array}\right\} \quad (8\text{-}247)$$

式中 S——法兰颈厚度，mm；

d——法兰钢管的外径，mm；

t——连接钢管的壁厚，mm。

（3）法兰厚度（C）计算。

$$\left.\begin{array}{ll}顶力： & R_{\text{f}}=T_{\text{b}}\dfrac{b}{a}\\ 剪应力： & \tau=1.5\dfrac{R_{\text{f}}}{CE}\leqslant f_{\text{V}}\\ 正应力： & \sigma=\dfrac{5R_{\text{f}}e_0}{EC^2}\leqslant f\end{array}\right\} \quad (8\text{-}248)$$

式中 R_{f}——法兰板之间顶力，N；

C——法兰盘厚度，mm；

E——螺栓间距，mm；

e_0——螺栓螺帽（螺母）边缘到法兰盘外边缘的距离，e_0=0.5a，mm。

（4）法兰高度（H）计算。

1）对焊法兰：

$$H=E_{\text{d}}C+H_1 \quad (8\text{-}249)$$

式中 H——法兰高度，mm；

E_{d}——对焊法兰高度系数，取 2.2；

H_1——法兰颈部高度：

当 d≤406mm，取 20mm；

当 406<d≤711mm，取 25mm；

当 711<d≤965mm，取 30mm。

2）平焊法兰：

$$H=E_{\text{p}}C \quad (8\text{-}250)$$

式中 E_{p}——平焊法兰高度系数：

当 C≤40mm，取 1.85；

当 40<C≤50mm，取 1.7，若 H<74mm，H 取 74mm；

当 50mm<C，取 1.6，若 H<85mm，H 取 85mm。

3）法兰颈根部直径（D）的计算。

a）对焊法兰：

$$D_{\text{N}}=[(H-C-H_1)\tan\theta+(S-t)/2]\times 2+A \quad (8\text{-}251)$$

式中 A——对焊法兰焊端外径，mm：

θ——法兰颈变坡角度。

b）平焊法兰：

$$D_{\text{N}}=[(H-C)\tan\theta+S]\times 2+B \quad (8\text{-}252)$$

式中 B——平焊法兰内径，mm。

九、钢管相贯连接计算

（1）圆钢管相贯焊接时，应按式（8-254）～式（8-263）计算主管节点承载力，公式的适用范围为：

1）0.2≤β≤1.0（β为支管外径与主管外径之比）；

2）d_i/t_i≤60（d_i、t_i为支管的外径和壁厚）；

3）d/t≤100（d、t为主管的外径和壁厚）；

4）θ≥30°（θ为支管轴线与主管轴线之夹角）；

5）60°≤ϕ≤120°（ϕ为空间管节点支管的横向夹角，即支管轴线在主管横截面所在平面投影的夹角）。

（2）在满足下列情况下，分析桁架杆件内力时可将相贯焊节点视为铰接：

1）符合各类节点相应的几何参数的适用范围；

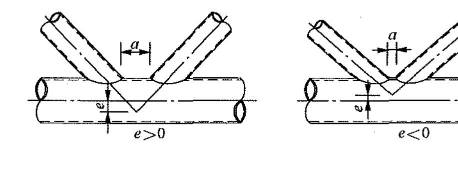
2）在桁架平面内杆件的节间长度或杆件长度与钢管管径之比不小于 12（主管）和 24（支管）时。

（3）若支管和主管相贯连接的节点偏心不超过式（8-253）限制时，在计算节点和受拉主管承载力时，可忽略因偏心引起的弯矩的影响，但受压主管必须考虑此偏心弯矩 $M=\Delta N\times e$（ΔN 为节点两侧主管轴力之差值）的影响，即

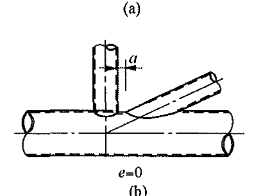
$$-0.55\leqslant e/d\leqslant 0.25 \quad (8\text{-}253)$$

式中 e——偏心距，mm，符号如图 8-141 所示；

d——钢管主管的外径，mm。



(a)



(b)

图 8-141 K 型和 N 型钢管相贯节点的偏心和间隙

（a）有间隙的 K 型节点；（b）有间隙的 N 型节点

（4）为保证节点处主管的强度，支管的轴心力不得大于下列规定中的承载力设计值：

1）X 形节点［见图 8-142（a）］：

a）受压支管在管节点处的承载力设计值 $N_{\text{cX}}^{\text{pj}}$ 应按下式计算：

$$N_{\text{cX}}^{\text{pj}}=\frac{5.45}{(1-0.81\beta)\sin\theta}\psi_{\text{n}}t^2 f \quad (8\text{-}254)$$

式中 ψ_{n}——参数，$\psi_{\text{n}}=1-0.3\dfrac{\sigma}{f_{\text{y}}}-0.3\left(\dfrac{\sigma}{f_{\text{y}}}\right)^2$，当节点两侧或一侧主管受拉时，则取 $\psi_{\text{n}}=1$；

f——主管钢材的抗拉、抗压和抗弯强度设计值，N/mm²；

f_y——主管钢材的屈服强度，N/mm²；

σ——节点两侧主管轴心压应力的较小绝对值，N/mm²。

b）受拉支管在管节点处的承载力设计值 N_{tX}^{pj} 应按下式计算：

$$N_{tX}^{pj} = 0.78\left(\frac{d}{t}\right)^{0.2} N_{cX}^{pj} \tag{8-255}$$

2）T 型（或 Y 型）节点［见图 8-142（b）和（c）］。

a）受压支管在管节点处的承载力设计值 N_{cT}^{pj} 应按下式计算：

$$N_{cT}^{pj} = \frac{11.51}{\sin\theta}\left(\frac{d}{t}\right)^2 \psi_n \psi_d t^2 f \tag{8-256}$$

式中：ψ_d 为参数，当$\beta \leqslant 0.7$ 时，$\psi_d = 0.069+0.93\beta$，当$\beta > 0.7$ 时，$\psi_d = 2\beta - 0.68$。

b）受拉支管在管节点处的承载力设计值 N_{tT}^{pj} 应按下式计算：

当$\beta \leqslant 0.6$ 时：

$$N_{tT}^{pj} = 1.4 N_{cT}^{pj} \tag{8-257}$$

当$\beta > 0.6$ 时：

$$N_{tT}^{pj} = (2-\beta) N_{cT}^{pj} \tag{8-258}$$

3）K 型节点［见图 8-142（d）］。

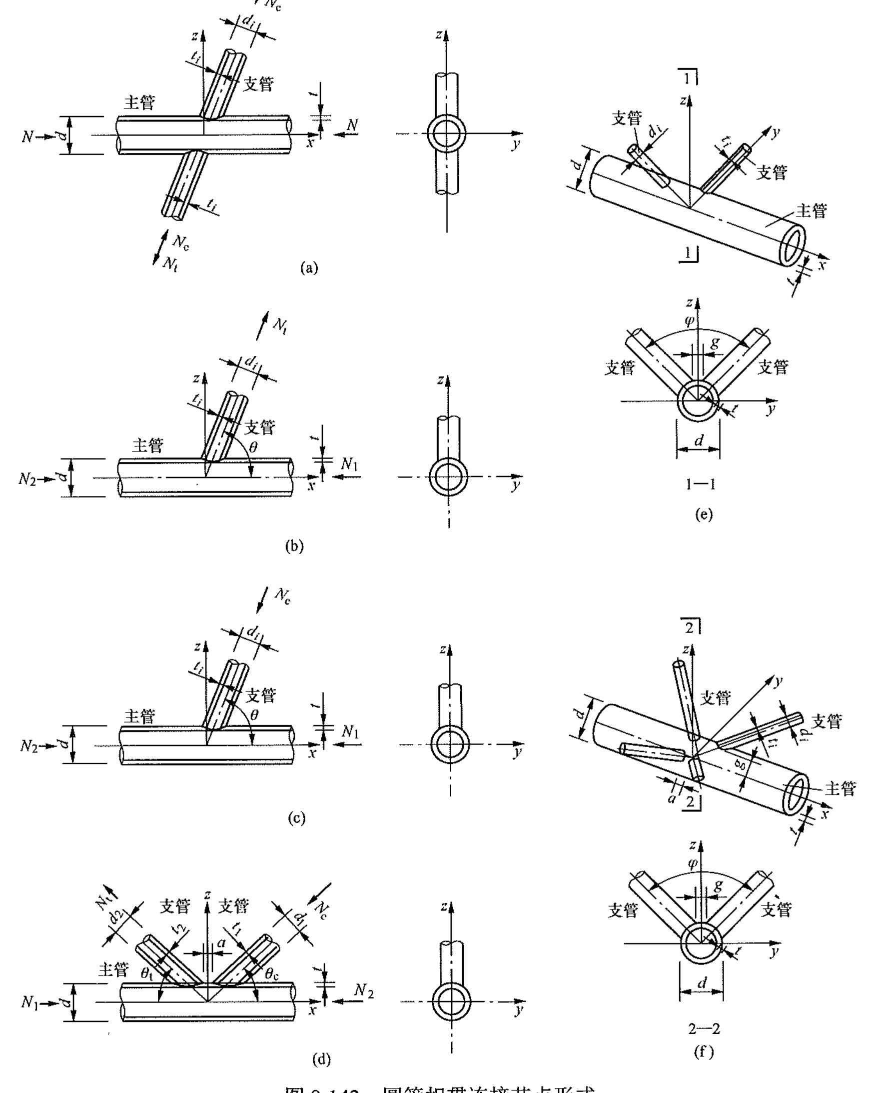


图 8-142　圆管相贯连接节点形式

（a）X 型节点；（b）T 型和 Y 型受拉节点；（c）T 型和 Y 型受压节点；（d）K 型节点；（e）TT 型节点；（f）KK 型节点

a）受压支管在管节点处的承载力设计值 N_{cK}^{pj} 应按下式计算：

$$N_{cK}^{pj}=\frac{11.51}{\sin\theta_c}\left(\frac{d}{t}\right)^{0.2}\psi_n\psi_d\psi_a t^2 f \qquad (8\text{-}259)$$

式中 θ_c——受压支管轴线与主管轴线之夹角；

ψ_a——参数，按下式计算：

$$\psi_a=1+\frac{2.19}{1+\frac{7.5a}{d}}\times\left(1-\frac{20.1}{6.6+\frac{d}{t}}\right)\times(1-0.77\beta) \qquad (8\text{-}260)$$

a——两支管间的间隙，当 $a<0$ 时，取 $a=0$。

b）受拉支管在管节点处的承载力设计值 N_{tK}^{pj} 应按下式计算：

$$N_{tK}^{pj}=\frac{\sin\theta_c}{\sin\theta_t}\times N_{cK}^{pj} \qquad (8\text{-}261)$$

式中 θ_t——受拉支管轴线与主管轴线之夹角。

4）TT 型节点［见图 8-142（e）］：

a）受压支管在管节点处的承载力设计值 N_{cTT}^{pj} 应按下式计算：

$$N_{cTT}^{pj}=\psi_g N_{cT}^{pj} \qquad (8\text{-}262)$$

$$\psi_g=1.28-0.64\frac{g}{d}\leqslant 1.1$$

式中 g——两支管的横向间距。

b）受拉支管在管节点处的承载力设计值 N_{tTT}^{pj} 应按下式计算：

$$N_{tTT}^{pj}=N_{tT}^{pj} \qquad (8\text{-}263)$$

5）KK 型节点［见图 8-142（f）］。受压或受拉支管在管节点处的承载力设计值 N_{cKK}^{pj} 或 N_{tKK}^{pj} 应等于 K 型节点相应支管承载力设计值 N_{cK}^{pj} 或 N_{tK}^{pj} 的 0.9 倍。

十、钢管插板连接

（1）构件连接的插板型式有 U 型、I 型、C（槽）型、T 型和 X（十字）型插板等型式，五种插板型式如图 8-143 所示。五种插板应根据杆塔构件的位置、受力特性、受力大小和构造要求进行布置，布置在不同的部位。

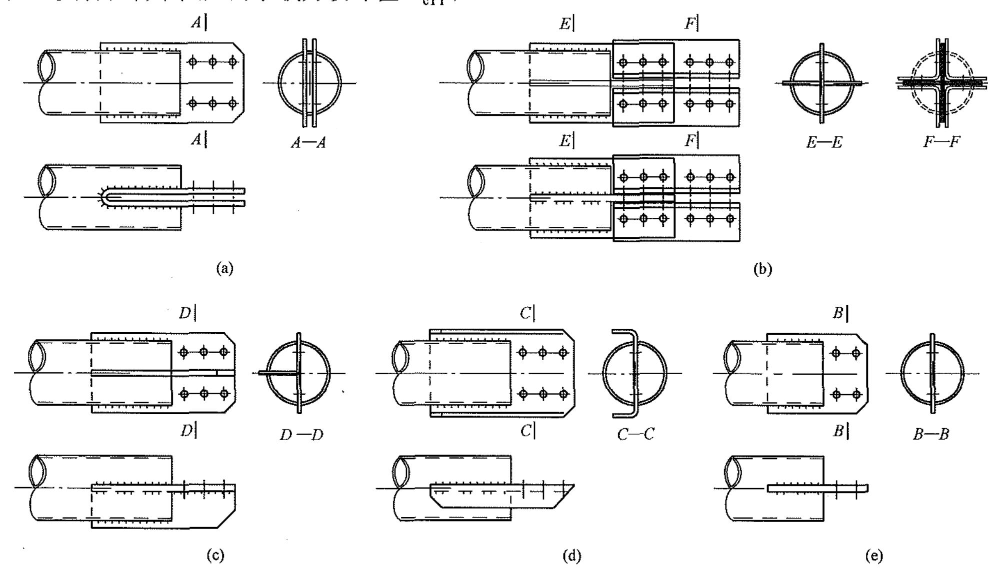


图 8-143 插板型式结构图

（a）U 型插板连接；（b）十字型插板连接；（c）T 型插板连接；（d）槽型插板连接；（e）I 型插板连接

1）U 型插板。U 型插板连接试件无构造偏心，其连接螺栓为双剪，连接螺栓数量较少，但加工和安装相对复杂。试验中发现，U 型插板的受压杆件因加工偏差大，与连接板连接不密实，端头约束较弱，以致其受压承载力比 C 型插板的杆件还低。

U 型插板宜用于受力较大的拉杆中，例如横担上平面主材拉杆和与之相连的塔身横隔材等。

2）X（十字）型插板。十字型插板采用的螺栓是双剪连接，较 U 型插板连接的尺寸可进一步减小，这种节点具有优越的抗疲劳强度和应力分布，在绝大部分部位可代替相贯连接。

十字型插板用于受力较大的塔身斜材连接、交叉斜材的交叉节点和横担下平面的受压主材与塔身主材的连接等，可充分发挥十字型断面两个方向的刚度和螺栓的双剪特点。

3）T 型插板。T 型插板用于管截面较大而内力较小的构件，既保证了管头部分的结构刚度，又使得辅助材的支撑作用得到了保证，由于受力较小，其断面的偏心影响可以忽略。

4）C 型插板。C 型插板连接用于管截面不是很大

的斜材或辅助材构件，制弯截面加强了插板厚度方向的节点刚度，这种插板型式由于加工制造和施工安装均比较方便，广泛应用于钢管塔的节点连接中。

5）I 型插板。I 型插板用于管径较小、受力也较小的辅助材中，由于该种插板在板厚方向的刚度几乎没有，所以在重要的结构中很少被采用。

设计者应根据工程的特点和实际受力情况，灵活合理采用 U、C、X、T、I 型五种插板型式。

（2）钢管结构常用的节点型式有以下几种，设计人员可以根据铁塔的实际情况进行优化设计和构造处理。

1）主材与斜材的连接，如图 8-144 所示。

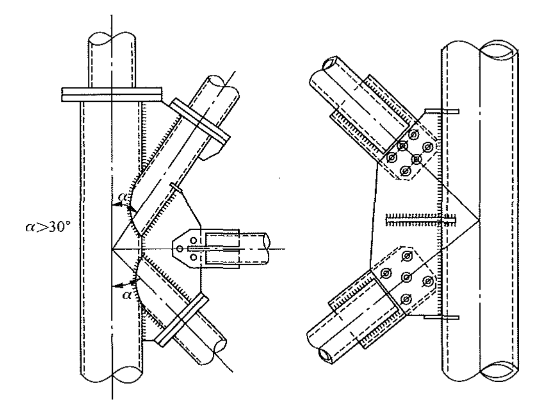


图 8-144　主材与斜材的连接示意图

2）塔身交叉斜材节点。交叉斜材相贯连接如图 8-145 所示，交叉斜材插板连接如图 8-146 所示。

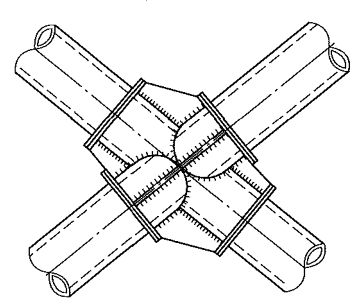


图 8-145　交叉斜材相贯连接

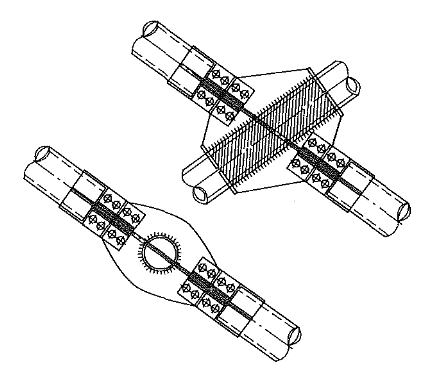


图 8-146　交叉斜材插板连接

3）隔面横材与身部主材连接节点。隔面横材与主管连接如图 8-147 和图 8-148 所示。

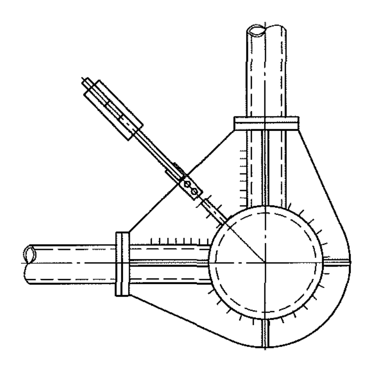


图 8-147　隔面横材与主管连接

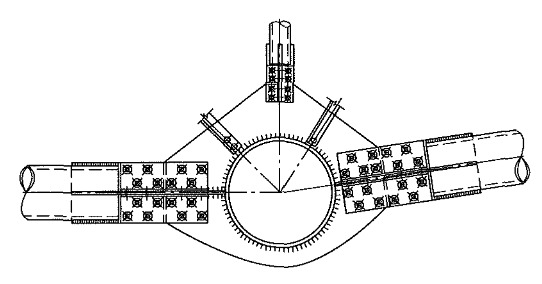


图 8-148　隔面横材与主管连接

4）塔身顶部节点示意图，如图 8-149 所示。

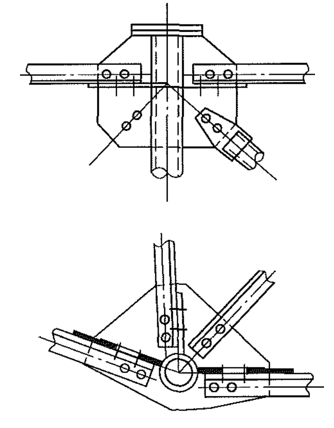


图 8-149　塔身顶部节点示意图

5）横担与主管连接示意图，如图 8-150 所示。

（3）在钢管节点壁设置环形加劲板可防止管壁局部变形，其所对应的圆心角不宜小于 30°，如图 8-151 所示，位于同一平面内的相邻加强板应连成为一块。

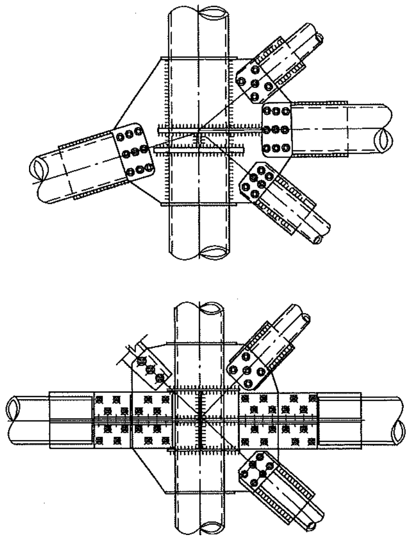


图 8-150　横担与主管连接示意图

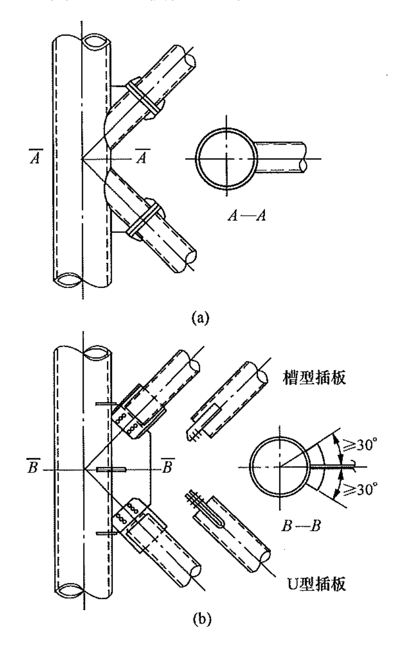


图 8-151　钢管 K 节点构造图

（4）钢管主材和斜材轴线之间或斜材与斜材轴线之间的夹角不宜小于 30°；横担上平面受拉主材与下平面主材之间的夹角不宜小于 18°；塔腿斜材与主材之间的夹角不宜小于 20°。

（5）由于斜材的内力相比主材而言要小很多，主材的断面刚度要远远大于斜材的断面刚度，如果将 K 节点布置成负偏心连接，不仅可以有效减小连接板的尺寸、有利于节点板的稳定，还有利于减小构件挡风面积、节约钢材消耗，而且对节点的强度几乎没有影响，所以建议对于受力较小的斜材和辅助材可以采用 1/4 管径负偏心的构造处理，如图 8-152 所示。

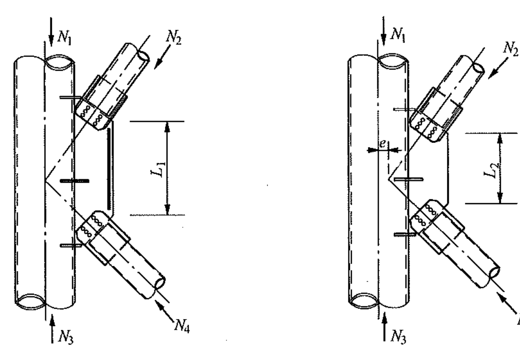


图 8-152　K 节点负偏心连接构造

十一、钢管连接节点板的承载力计算

节点板承载力计算见本节第四条。

钢管的插板节点应根据钢管塔构件所在的位置，受力特性、受力大小和构造要求进行合理布置。并需经过强度、稳定、连接等计算，同时应注意插板与连接板的强度匹配和插板构造的要求。

十二、塔脚板

（一）塔脚板的构造

塔脚板上地脚螺栓的布置，应与铁塔主角钢的重心线成对称布置，以保证各地脚螺栓均匀受力。考虑到加工和施工误差，地脚螺栓孔径一般可取地脚螺栓直径的 1.3～1.5 倍左右。但为防止铁塔受力后塔脚发生侧移使塔腿部分构件产生次应力，地脚螺栓与螺孔之间的孔隙，宜用可靠方法予以堵塞，或将垫板与底板焊起来。考虑地脚螺栓锚固构造，地脚螺栓间距不宜小于其直径的 4 倍。在布置加劲肋时，要考虑拧紧地脚螺栓帽时放置扳手的可能，并留一定的余地。

（二）塔脚板尺寸的确定

1. 按构造确定底板尺寸

按构造要求确定塔脚板尺寸（mm）：一般在地脚螺栓帽下应设置方垫板（见图 8-153），方垫板宽度 $b \geqslant 2.5\sim3.0d$（d 为地脚螺栓直径），地脚螺栓中心至加劲板边缘的最小距离 $a_1 > \dfrac{b}{2} + \left(\dfrac{d_0 - d}{2}\right) + 10\sim20\,\text{mm}$，故塔脚板的总宽度 $B \geqslant 2(z_0 + \delta_1 + a_1 + c)$，其中 $c \geqslant \dfrac{b}{2} + 10\sim$ 20mm。

2. 按基础混凝土抗压强度确定底板尺寸

$$A_j \geqslant \frac{N}{f_c} \tag{8-264}$$

式中　A_j ——塔脚板净面积，如为方形且有四个地脚螺栓孔，则 $A_j = B^2 - \pi d_0^2$，mm²；

B ——塔脚板的宽度，mm²；

d_0 ——地脚螺栓孔径，mm；
N ——塔脚板所受的压力，N；
f_c ——基础混凝土的抗压强度设计值，N/mm²。

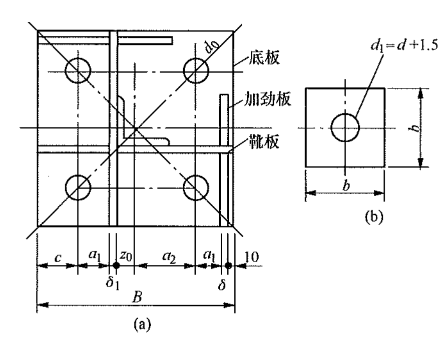


图 8-153 塔脚板的构造
（a）平面图；（b）方垫板

（三）无加劲方型塔脚板底板强度计算（见图 8-154）

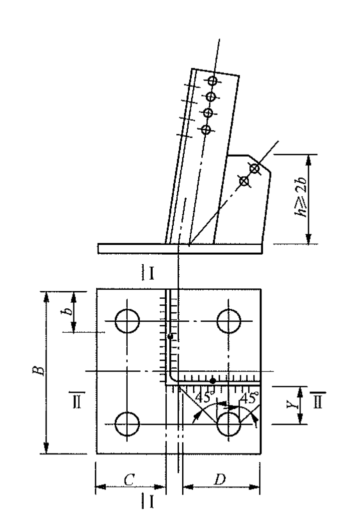


图 8-154 无加劲塔脚板

1. 受压时

（1）底板厚度

$$\left.\begin{aligned} t &\geq \sqrt{\frac{3QC^2}{f}} \\ Q &= \frac{N}{A} \end{aligned}\right\} \tag{8-265}$$

式中 Q ——底板的均布反力，N/mm²；
N ——基础作用下压力，N；
A ——底板面积（$B\times B$），mm²；
C ——主角钢边至底板边的距离，mm；
t ——底板的厚度，mm。

（2） I - I 断面强度：

$$\left.\begin{aligned} W_1 &= \frac{1}{6}Bt^2 \\ M_1 &= QB\frac{C^2}{2} \\ \sigma_1 &= \frac{M_1}{W_1} \leqslant f \end{aligned}\right\} \tag{8-266}$$

式中 W_1 —— I - I 断面的抗弯模量，mm³；
M_1 —— I - I 断面的弯矩，N·mm；
B ——底板宽度，mm。

2. 受拉时

（1）地脚螺栓受力 T_1 为

$$T_1 = \frac{T}{4} \tag{8-267}$$

式中 T ——基础作用上拔力，N；
T_1 ——一个地脚螺栓承受的上拔力，N。

（2） II - II 断面强度：

$$\left.\begin{aligned} W_2 &= \frac{1}{6}Dt^2 \\ M_2 &= T_1 Y \\ \sigma_2 &= \frac{M_2}{W_2} \leqslant f \end{aligned}\right\} \tag{8-268}$$

式中 W_2 ——一个地脚螺栓对应的 II - II 断面的抗弯模量，mm³；
M_2 ——一个地脚螺栓对应的 II - II 断面的弯矩，N·mm；
D ——一个地脚螺栓对应的 II - II 断面的计算宽度，mm；
Y ——一地脚螺栓中心至主角钢边的距离，mm。

（3）主角钢与底板的连接焊缝根据焊缝剖口尺寸的实际情况按本章第九节第三条计算。

3. 无加劲塔脚板底板强度计算公式的适用条件

（1）主角钢的重心应位于底板的中心；

（2）当斜材与主角钢直接用螺栓连接时，主角钢肢尖焊接的钢板仍应保留，其高度 h 不小于 $2b$（b 为钢板与底板满焊的宽度），厚度可取 $t-2$mm （t 为主角钢的厚度）。

（四）有加劲方型塔脚板底板强度计算（见图 8-155）

1. 受压时

$$\left.\begin{aligned} M &= 0.06Qa^2 \\ t &\geq \sqrt{\frac{5M}{f}} \end{aligned}\right\} \tag{8-269}$$

式中 M ——底板的作用弯矩，N·mm²；
a ——底板计算区段的自由边长度，mm；
t ——底板厚度，mm。

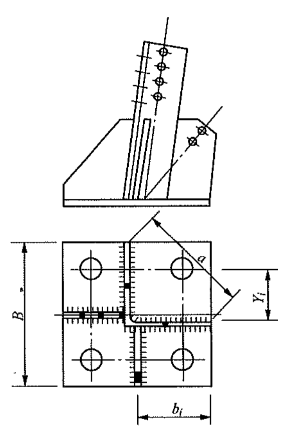


图 8-155 有加劲塔脚板

2. 受拉时底板厚度

$$t = \frac{1}{1.5}\sqrt{\frac{3T}{fB^2} \times (Y_i b_i)_{\max}} \tag{8-270}$$

式中 T ——底板上作用的拉力，N；

B ——塔脚板宽度，mm；

Y_i ——第 i 个区隔地脚螺栓中心至主角钢的距离，mm，当 $Y_i < 0.5b_i$ 时，取 $Y_i = 0.5b_i$；

b_i ——第 i 个区隔的宽度，mm。

（五）8 个地脚螺栓塔脚板计算

8 个螺栓的方型塔脚板设计，计算模型和构造布置如图 8-156 所示。当没有布置加劲板时，其底板强度的计算公式同 4 个地脚螺栓无加劲板的计算公式一致，单个螺栓所对应的假定受力区域之 D、Y 值如图中所示。当布置有加劲板时，底板强度可按照 3 边固端、一边自由进行计算，也可按照图示三分之一区域的受力范围按照式（8-268）进行计算。

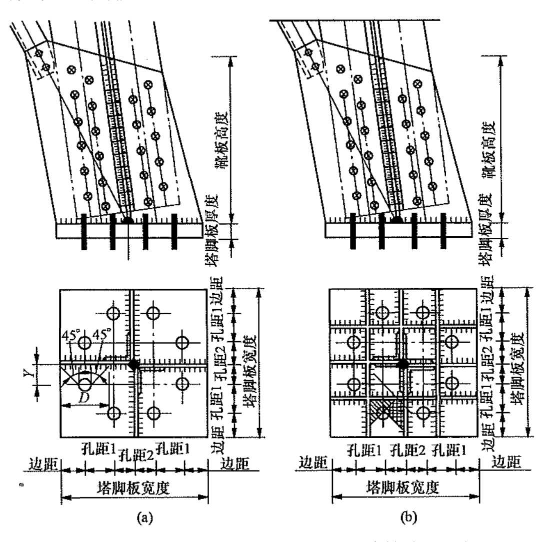


图 8-156 8 个地脚螺栓塔脚板结构布置图
（a）8 个地脚螺栓的情况（无加劲板）；（b）8 个地脚螺栓的情况（有加劲板）

（六）靴板计算

（1）塔脚板受压时假定每块靴板承受由两靴板交点处作 45° 压力分布线范围内的全部反力，因此靴板承受一个按三角形规律分布的荷载，最大反力在塔脚板边缘（见图 8-156）。

靴板所受的切力为

$$Q \approx \int_0^L q_x \mathrm{d}x = \frac{1}{2} LB\sigma \tag{8-271}$$

靴板所受的弯矩为

$$\left.\begin{aligned} M &\approx \int_0^L q_x x \mathrm{d}x = \frac{1}{3} L^2 B\sigma \\ \sigma &= N / A_j \end{aligned}\right\} \tag{8-272}$$

式中 A_j ——塔脚板净面积，mm²；

其他符号见图 8-157。

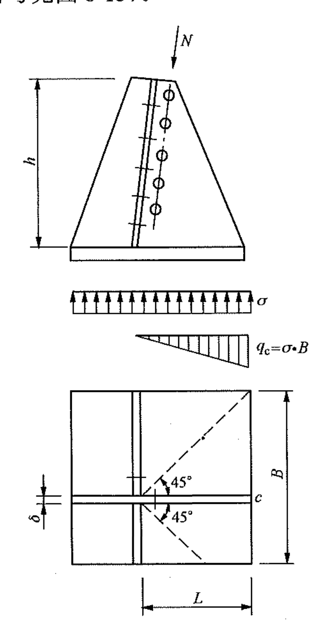


图 8-157 靴板受压计算简图

（2）当塔脚板受拉时，可近似假定每个地脚螺栓所受的拉力平均向各邻近的靴板和加劲肋分布。靴板所承受的弯矩即为此靴板和加劲肋所分担的拉力和此力到靴板与主角钢连接螺栓线之间距离的乘积。靴板所需高度 h 为

$$h = \sqrt{\frac{6M}{\delta f}} \tag{8-273}$$

式中 δ ——靴板的厚度，mm；

f ——钢材的强度设计值，N/mm²。

十三、拉板计算

拉线塔的拉线板、导线的挂板等，由于连接金具尺寸的限制，其最小端距、边距往往不能满足表 8-73

的要求，此时可按以下方法验算强度。

（一）水平截面 A-A 的强度

如图 8-158 所示的拉板，其水平截面的强度因受孔边应力集中的影响，孔边处最大拉应力可按式（8-274）计算：

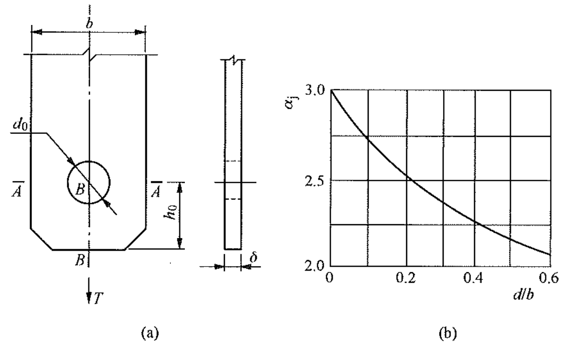


图 8-158　拉板计算简图

（a）拉板受力简图；（b）应力集中系数

$$\sigma = \frac{T}{(b-d_0)\delta}\alpha_j \leqslant f \qquad (8\text{-}274)$$

（二）垂直截面 B-B 的强度

孔边切向最大应力可按式（8-275）计算：

$$\sigma = \frac{T\left(h_0^2+0.25d_0^2\right)}{d\delta\left(h_0^2-0.25d_0^2\right)} \leqslant f \qquad (8\text{-}275)$$

（三）孔壁承压应力

孔壁承压应力可按式（8-276）计算：

$$\sigma_M = \frac{T}{d\delta} \leqslant f_c^b \qquad (8\text{-}276)$$

式中　T ——拉板所受的拉力，N；

f ——钢材的强度设计值，N/mm²；

f_c^b ——钢材的孔壁承压强度设计值，N/mm²；

d ——螺栓直径，mm；

b ——拉板宽度，mm；

α_j ——应力集中系数；

d_0 ——螺栓孔径，mm；

δ ——拉板厚度，mm；

h_0 ——螺栓中心到拉板边缘的距离（端距），mm。

第十节　算　　例

一、拔梢单杆计算

（一）设计条件

（1）线路电压为 35kV（单回）。

（2）导线型号为 LGJ-120，地线型号为 GJ-35。

（3）设计水平档距为 220m，垂直档距为 300m。

（4）采用固定线夹。

（5）电杆采用离心法制造。选用梢径 ϕ230mm、圆锥度 1/75 的拔梢杆段，全长 18m，按 9+9（m）分段；壁厚 55mm，C50 级混凝土，预应力钢筋。

（6）电杆外形尺寸见图 8-159，标准呼称高 11.8m。

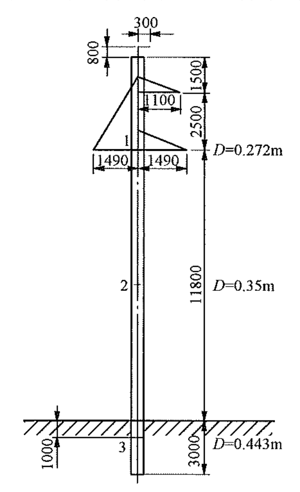


图 8-159　35kV 电杆计算外形图

（二）设计荷载

现假设拔梢单杆设计荷载详见表 8-77。

表 8-77　　35kV 拔梢单杆设计荷载表

塔型	呼称高（m）	转角范围（°）	标准档距（m）	水平档距（m）	垂直档距（m）	最大允许档距（m）	代表档距（m）前/后	导线规格 型号	导线规格 截面（mm²）	地线规格 型号	地线规格 截面（mm²）
Z_{g1}	11.8	0	204	220	300	275	220	LGJ-120	137	GJ-35	37.2

气象、荷载及张力＼情况		正常 覆冰	正常 最大风	正常 最低温	安装	事故
气象条件	温度（℃）	−5	−5	−20	−15	−15
	冰厚（mm）	10	0	0	0	0
	风速（m/s）	10	25	10	10	0

续表

气象、荷载及张力 \ 情况			正常 覆冰	正常 最大风	正常 最低温	安装	事故
水平荷载	导线每相	导线（N）	580	1330		250	
		绝缘子（N）	10	90		10	
		共计（N）	590	1420		260	
		分配（N）					
	地线每根（N）		460	680		130	
垂直荷载	导线每相	导线（N）	3620	1480		1480	1480
		绝缘子（N）	320	220		220	220
		防振锤（N）					
		共计（N）	3940	1700		1700	1700
		分配（N）					
	地线每根（N）		2470	950		950	950
张力	导线每相	前侧张力	14000	11800		10000	11350
		后侧张力					
	地线每相	前侧张力	11150	9300		9000	9850
		后侧张力					
	直线塔导线断线张力（N）						7600

（三）正常情况主杆内力和挠度计算

1. 杆身风压及其合力作用点高度计算

荷载见图 8-160。

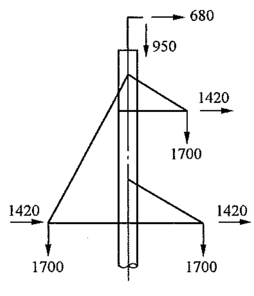


图 8-160 荷载简图

（1）杆身风压计算：

$$q_{0-1}=\frac{25^2}{1.6}\times0.7\times\frac{0.23+0.272}{2}=69\ \text{N/m}$$

$$q_{0-2}=\frac{25^2}{1.6}\times0.7\times\frac{0.23+0.35}{2}=79\ \text{N/m}$$

$$q_{0-3}=\frac{25^2}{1.6}\times0.7\times\frac{0.23+0.443}{2}=92\ \text{N/m}$$

（2）杆身各段风压合力作用点高度计算：

$$\bar{h}_{0-1}=\frac{3.2}{3}\times\frac{2\times0.23+0.272}{0.23+0.272}=1.56\text{m}$$

$$\bar{h}_{0-2}=\frac{9.0}{3}\times\frac{2\times0.23+0.35}{0.23+0.35}=4.2\text{m}$$

$$\bar{h}_{0-3}=\frac{16.0}{3}\times\frac{2\times0.23+0.443}{0.23+0.443}=7.15\text{m}$$

2. 杆身弯矩计算

$$M_0=950\times0.3=285\text{N}\cdot\text{m}$$

$$M_1=(680\times4+1420\times2.5+69\times3.2\times1.56)\times1.15\times1.4+(950\times0.3+1700\times1.1)\times1.2=13235\text{N}\cdot\text{m}$$

$$M_2=[680\times9.8+1420\times(8.4+2\times5.9)+79\times9.1\times4.2]\times1.15\times1.4+(950\times0.3+1700\times1.1)\times1.2=64357\text{N}\cdot\text{m}$$

$$M_3=[680\times16.8+1420\times(15.3+2\times12.8)+92\times16\times7.15]\times1.15\times1.4+(950\times0.3+1700\times1.1)\times1.2=131429\text{N}\cdot\text{m}$$

3. 电杆挠度计算

水平合力

$$\sum P=680+3\times1420+92\times16=6412\text{N}$$

合力作用点高度

$$\bar{h}=\left[680\times16.8+1420(15.3+2\times12.8)+92\times16\times7.15\right]/6412=12.5\text{m}$$

挠度计算点高度

$$H=16.8\text{m}$$

电杆平均直径交点的高度

$$D=\left(\frac{185}{398-185}\right)\times16+16=29.9\text{m}$$

因此

$$c=\frac{\bar{h}}{H}=\frac{12.5}{16.8}=0.744$$

$$\alpha=\frac{D}{H}=\frac{29.9}{16.8}=1.78$$

根据此值c和α，从图8-95中查出挠度系数K=1.07，经过计算杆根固定处的刚度$B_d=1.82\times10^{11}\text{N}\cdot\text{cm}^2$，则挠度为

$$y=\frac{K\sum PH^3}{3B_d}=\frac{1.07\times6412\times1680^3}{3\times1.82\times10^{11}}=59.6\text{cm}$$

由土壤压缩变形引起的杆身角变位为

$$\varphi_P=\frac{C_1\sum P}{E_0h_0^2}(6\gamma+3)\varepsilon$$

地质条件按稍湿的粉细砂土，由表8-41查出$E_0=36000\text{kN/m}^2=3600\text{N/cm}^2$有上卡盘考虑，取系数$C$=0.75，由$b/h_0$=0.443/3.0=0.148，查表8-42，得$\varepsilon=5.625$，$\gamma=\bar{h}/h_0=12.5/3=4.17$，则

$$\varphi_P=\frac{0.75\times6413}{3600\times300^2}(6\times4.17+3)\times5.625=0.0023$$

在垂直荷载偏心弯矩作用下，由于土壤压缩变形引起的杆身角变位很小，故略去不计，则杆身总挠度为

$$\delta=59.6+0.0023\times1680=63.5\text{cm}$$

（四）事故情况电杆内力计算

在工程设计中，对任一相导线断线时均应计算，本例仅计算断下导线时的情况（见图8-161）。事故时可变荷载组合系数为0.75。

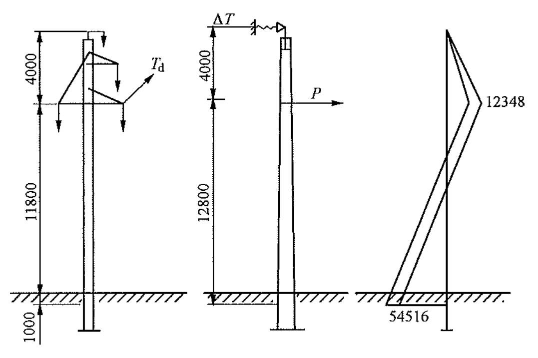


图8-161　35kV电杆事故情况计算简图

1. 地线支持力计算

事故情况可以考虑地线支持力，根据设计条件，按第五章中“导线断线时地线支持力计算”中的计算方法，其最小支持力ΔT_{min}=2700N，最大支持力ΔT_{max}=2940N。

2. 电杆弯矩计算

$$M_3=(7600\times12.8-2700\times16.8)\times1.4\times0.75=54516\text{N}\cdot\text{m}$$

$$M_3=-2940\times4\times1.4\times0.75=12348\text{N}\cdot\text{m}$$

横担转动前杆身承受的扭矩为

$$M_K=2500\times1.49\times1.4\times0.75=3911\text{N}\cdot\text{m}$$

（五）考虑地线张力差时，电杆内力计算

计算地线张力差时，不考虑导线的支持作用，则杆根弯矩为

$$M_3=0.2\times11150\times(12.8+4.0)\times1.4\times0.75=39337\text{N}\cdot\text{m}$$

（六）主杆配筋计算

对于自立式拔梢单杆，可用普通钢筋混凝土与预应力钢筋混凝土电杆。目前，预应力电杆已较多地应用于工程中，现按预应力电杆计算主杆配筋。

1. 上段主杆配筋计算

已知上段主杆弯矩：M_2=64357 N·m，断面外半径r_2=17.5cm，内半径r_1=12.0cm，纵向预应力所在半径r_p=14.75cm，断面面积A=509cm^2；采用C50级混凝土，f_c=2310N/cm^2；采用预应力钢筋，f'_p=41000N/cm^2，f_p=51000N/cm^2，f_{py}=80000N/cm^2；钢筋张拉应力取0.6f_p，应力损失σ_L取10000N/cm^2，钢筋用14ϕ12、A_p=15.83cm^2。由此得钢筋张拉应力

$$\sigma_{con}=0.6\times80000=48000\text{N/cm}^2$$

$$\sigma_{po}=48000\times10000=38000\text{N/cm}^2$$

计算断面2抗弯承载力为

$$M=\alpha_1f_cA(r_1+r_2)\times\frac{\sin\pi\alpha}{2\pi}+f'_pA_pr_p\times\frac{\sin\pi\alpha}{\pi}+(f_p-\sigma_{po})A_pr_p\times\frac{\sin\pi\alpha_t}{\pi}$$

由

$$\alpha=f_pA_p/[\alpha_1f_cA+f'_pA_p+1.5(f_p-\sigma_{po})A_p]$$
$$=51000\times15.83/\left[\begin{matrix}1.0\times2310\times509+41000\times15.83+\\1.5\times(51000-38000)\times15.83\end{matrix}\right]$$
$$=0.378$$

$$\alpha_t=1-1.5\alpha=1-1.5\times0.378=0.433$$

得

$$M=1.0\times2310\times509\times(12.0+17.5)\times\frac{\sin0.378\pi}{2\pi}+41000\times15.83\times14.75\times\frac{\sin0.378\pi}{\pi}+(51000-38000)\times15.83\times14.75\times\frac{\sin0.433\pi}{\pi}$$

$$=8898410\text{N}\cdot\text{cm}$$

$$=88984\text{N}\cdot\text{m}>M_2=64357\text{N}\cdot\text{m}$$

$$\omega=(f_p\cdot A_p)/(\alpha_1\cdot f_c\cdot A)=(51000\times15.83)/(1.0\times2310\times509)=0.69\leqslant0.75$$

2. 下段主杆配筋计算

已知 M_3=131429N·m，r_1=16.65cm，r_2=22.15cm，r_p=19.4cm，配 18ϕ12，断面面积 A=670cm²，A_p=20.35cm²。

计算断面 3 抗弯承载力 M 如下。

$$\alpha=f_pA_p/[\alpha_1f_cA+f_p'A_p+1.5(f_p-\sigma_{po})A_p]$$

$$=51000\times20.35/[1.5\times(51000-38000)\times20.35+1.0\times2310\times670+41000\times20.35]$$

$$=0.373$$

$$\alpha_t=1-1.5\alpha=1-1.5\times0.373=0.44$$

$$M=1.0\times2310\times670\times(16.65+22.15)\times\frac{\sin(0.373\pi)}{2\pi}+41000\times20.35\times19.4\times\frac{\sin(0.373\pi)}{\pi}+(51000-38000)\times20.35\times19.4\times\frac{\sin(0.44\pi)}{\pi}$$

$$=15170752\text{N}\cdot\text{cm}$$

$$=151708\text{N}\cdot\text{m}>M_3=131429\text{N}\cdot\text{m}$$

$$\omega=(f_p\cdot A_p)/(\alpha_1\cdot f_c\cdot A)=(51000\times20.35)/(1.0\times2310\times670)=0.67\leqslant0.75$$

抗裂验算及变形验算过程略。

（七）横担及吊杆计算

（1）以下横担计算为例，如图 8-162 所示，采用转动横担，起动张力为 T=2500N，垂直荷载 G=1700N，横担宽 25cm，长 120cm，高 100cm。

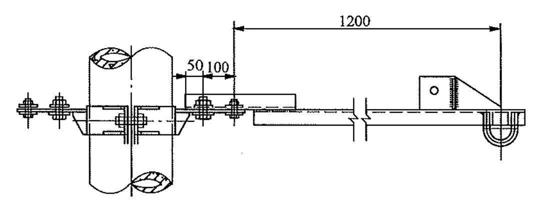


图 8-162 横担尺寸图

横担转动时剪切螺栓承受的切力为

$$Q=\frac{2500\times1.4\times0.75\times(120+10)}{10}=34125\text{N}$$

采用 4.8 级螺栓，抗剪强度设计值 f_v^b=17000N/cm²，则剪切螺栓面积为 F=34125/17000=2.007cm²。选用 M16 螺栓，F=2.01cm²，此时起动张力标准值约为 2500×2.01/2.007=2504N，转动时横担弯矩和压力 P 设计值分别为

$$M=2504\times1.4\times0.75\times120=315504\text{N}\cdot\text{cm}$$

$$P=1700\times1.2\times\frac{133}{100}=2713\text{N}$$

选用 Q235[8 槽钢，f=21500N/cm²，A_n=10.24−1.75×0.5=9.365cm²，W_x=25.3 cm³，则

$$\frac{N}{A_n}+\frac{M_y}{\gamma_yW_x}=\frac{2713}{9.365}+\frac{315504}{1.05\times25.3}=12166<21500$$

（2）吊杆的计算考虑安装时双倍起吊控制，荷载组合系数为 0.9。由此得

$$G=2\times1700\times1.1\times1.2+1500\times1.4\times0.9=6378\text{N}$$

$$N=6378\times\frac{166}{100}=10587\text{N}$$

选用 Q235L45×4 吊杆，A_n=3.486−1.75×0.4=2.786cm²，$\sigma=\frac{N}{A_n}=\frac{10587}{2.786\times0.7}=5429\text{N/cm}^2<21500\text{N/cm}^2$。转动螺栓按照构造要求选用 6.8 级 M24。

二、门型双杆计算

（一）设计条件

（1）线路电压为 110kV（单回）。

（2）导线型号为 LGJ-185，地线型号为 GJ-50。

（3）设计水平档距为 300m，垂直档距为 400m。

（4）采用固定线夹和固定横担。

（5）主杆用离心法制造。选用ϕ230mm、圆锥度 1/75 的拔梢杆段，全长 18m，按 9+9（m）分段。主杆接头用电焊连接，壁厚 50mm，用 C40 级混凝土、HRB335 钢筋。

（6）根据电气间隙要求，电杆外形尺寸如图 8-163 所示，标准呼称高为 12.8m。

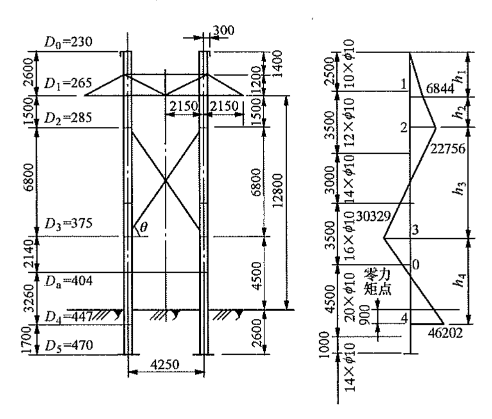


图 8-163 110kV 电杆外形图

（二）设计荷载

各种气象条件下的设计荷载，见表 8-78。

表 8-78 110kV 门型双杆设计荷载表

气象、荷载及张力 \ 情况		正常 覆冰	正常 最大风	正常 最低温	安装	断线
气象条件	温度（℃）	−5	−5	−40	−15	−30
	冰厚（mm）	10	0	0	0	0
	风速（m/s）	10	30	0	10	0
水平荷载（N）	导线	900	2850		410	
	地线	650	1370		200	
垂直荷载（N）	导线	7800	3700	3700	3700	3700
	地线	3800	1650	1650	1650	1650
地线张力（N）		16700				12700
断导线残存张力（N）						11000

（三）正常情况电杆内力计算

1. 零力矩点位置的确定

主杆埋深 2.6m，故假定根部按固定计算，其嵌固点位置在 2.6/3=0.9m 处（见图 8-163），则 h_4=0.9+4.5=5.4m。

电杆各点外径注于图 8-163 中，D_3=37.5cm，d_3=27.5cm，断面系数为

$$W_3=\frac{3.14}{32\times37.5}\left(37.5^4-27.5^4\right)=3678\text{cm}^3$$

D_4=44.7cm，d_4=34.7cm，断面系数为

$$W_4=\frac{3.14}{32\times44.7}\left(44.7^4-34.7^4\right)=5581\text{cm}^3$$

零力矩点（图 8-163 中 0 点）位置为

$$Z=5.4\times\frac{3678}{3678+5581}=2.14\text{m}$$

2. 主杆弯矩计算

110kV 电杆荷载分布见图 8-164。

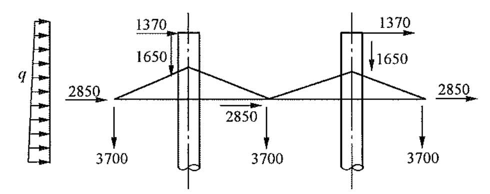


图 8-164 110kV 电杆荷载图

（1）杆身风压计算。

$$q_{0-1}=\frac{30^2}{1.6}\times0.7\times\frac{0.23+0.265}{2}=97\text{N/m}$$

$$q_{0-2}=\frac{30^2}{1.6}\times0.7\times\frac{0.23+0.285}{2}=101\text{ N/m}$$

$$q_{0-a}=\frac{30^2}{1.6}\times0.7\times\frac{0.23+0.404}{2}=125\text{ N/m}$$

（2）各段风压合力作用点高度为

$$\bar{h}_{0-1}=\frac{2.6}{3}\times\frac{2\times0.23+0.265}{0.23+0.262}=1.27\text{m}$$

$$\bar{h}_{0-2}=\frac{4.1}{3}\times\frac{2\times0.23+0.285}{0.23+0.285}=1.98\text{m}$$

$$\bar{h}_{0-a}=\frac{13.04}{3}\times\frac{2\times0.23+0.404}{0.23+0.404}=5.92\text{m}$$

（3）各段弯矩设计值计算。

$$M_1=(1370\times2.6+97\times2.6\times1.27)\times1.15\times1.4+1650\times1.2\times0.3=6844\text{N}\cdot\text{m}$$

$$M_2=0.55\times(2\times1370\times4.1+3\times2850\times1.5+2\times101\times4.1\times1.98)\times1.4\times1.15=22\,756\text{N}\cdot\text{m}$$

$$M_3=0.55\times(2\times1370+3\times2850+2\times125\times13.04)\times1.1\times2.14\times1.15\times1.4=30329\text{N}\cdot\text{m}$$

$$M_4=0.55\times(2\times1370+3\times2850+2\times125\times13.04)\times1.1\times3.26\times1.15\times1.4=46202\text{N}\cdot\text{m}$$

（四）事故情况电杆内力计算

事故断边导线荷载分布情况如图 8-165 所示。可变荷载组合系数为 0.75。

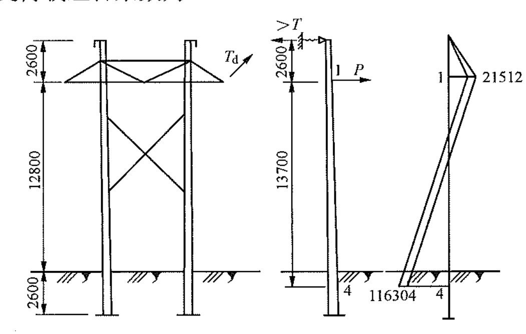


图 8-165 110kV 电杆事故断边导线情况计算简图

不带拉线电杆，事故情况可以考虑地线支持力。根据设计条件，按第五章中导线断线时地线支持力的计算方法，其计算最小地线支持力为ΔT_{min}=7350N，最大地线支持力为ΔT_{max}=7880N。由此得

杆根弯矩为

$$M_4=\left(0.85\times11000\times\frac{4250+2125}{4250}\times1.2\times13.7-7350\times16.3\right)\times1.4\times0.75=116304\text{N}\cdot\text{m}$$

横担处主杆弯矩为

$$M_1=7880\times2.6\times1.4\times0.75=21512\text{N}\cdot\text{m}$$

（五）考虑地线张力差时电杆内力计算

计算地线张力差时，不考虑导线的支持作用，则杆根处计算弯矩为

$$M_4=0.2\times12700\times1.4\times16.3\times0.75=43472\text{N}\cdot\text{m}<116304\text{N}\cdot\text{m}$$

（六）主杆配筋计算

考虑到主杆分段配筋，初步估算后，各点配筋注于图 8-163 中，现分别验算 1 点（M_1）及 4 点（M_4）强度。

（1）上段（M1）主杆强度验算：M_1=21512N·m，采用 C40 级混凝土，f_c=1910 N/cm²；HRB335 钢筋，f=30000N/cm²；断面外半径为 r_2=13.2cm，内半径为 r_1=8.2cm，钢筋所在圆半径 r_s=10.7cm，混凝土断面面积 A=336cm²，断面配筋为 14ϕ10、A_s=10.99cm²。

由

$$\alpha=fA_s/(\alpha_1f_cA+2.5fA_s)=30000\times10.99/(1.0\times1910\times336+2.5\times30000\times10.99)=0.225$$

$\alpha_t=1-1.5\alpha=1-1.5\times0.225=0.66<2/3$，则取 $\alpha_t=0.66$

$$M=\alpha_1f_cA(r_1+r_2)\frac{\sin\pi\alpha}{2\pi}+fA_sr_s\frac{\sin\pi\alpha+\sin\pi\alpha_t}{\pi}$$

$$M=1.0\times1910\times336\times(8.2+13.2)\times\frac{\sin0.225\pi}{2\pi}+30000\times10.99\times10.7\times\frac{\sin0.225\pi+\sin0.66\pi}{\pi}$$

$$=3128739\text{N}\cdot\text{cm}=31287\text{N}\cdot\text{m}>21512\text{N}\cdot\text{m}$$

$$\omega=fA_s/\alpha_1f_cA=30000\times10.99/(1.0\times1910\times336)=0.51<0.9$$

（2）下段主杆（M_4）强度验算：M_4=116304N·m，断面外半径 r_2=22.4cm，内半径 r_1=17.4cm，r_s=19.9cm；断面面积 A=625cm²，配筋为 20ϕ12、A_s=22.61cm²。由此得

由

$$\alpha=fA_s/(\alpha_1f_cA+2.5fA_s)=30000\times22.61/(1.0\times1910\times625+2.5\times30000\times22.61)=0.23$$

$\alpha_t=1-1.5\alpha=1-1.5\times0.23=0.65<2/3$，则取 $\alpha_t=0.65$

$$M=1.0\times1910\times625\times(17.4+22.4)\times\frac{\sin(0.23\pi)}{2\pi}+30000\times22.61\times19.9\times\frac{\sin(0.28\pi)+\sin(0.66\pi)}{\pi}$$

$$=11818409\text{N}\cdot\text{cm}=118184\text{N}\cdot\text{m}>116304\text{N}\cdot\text{m}$$

$$\omega=fA_s/\alpha_1f_cA=30000\times22.61/1.0\times1910\times625=0.57<0.9$$

（七）横担及吊杆计算

110kV 横担计算简图见图 8-166。

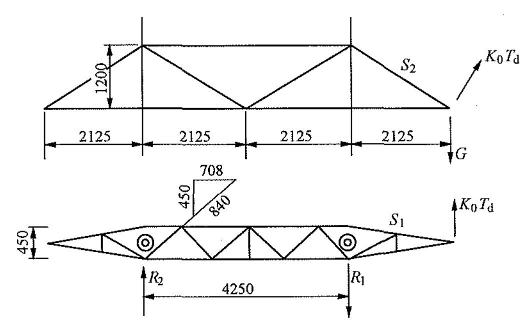


图 8-166 110kV 电杆横担计算简图

1. 横担内力

横担内力由断边导线情况控制。在断线瞬间，T_d=11000N，G=0.6×3700=2220N。故得

$$S_1=-\frac{2220\times1.2\times2.14}{2\times1.2}-\frac{11000\times1.4\times0.75\times2.14}{0.45}=-57302\text{N}$$

断线后修复时，有活动荷载 1500N，则：作用在 S_1 上的压力及弯矩分别为

$$S_1=-\frac{(2220\times1.2+1500\times1.4\times0.75)\times2.14}{2\times1.2}-\frac{11000\times1.4\times0.75\times2.14}{0.45}=-58706\text{N}$$

2. 吊杆内力

吊杆内力计算，主要由安装时的双倍起吊边导线控制，其最大轴向拉力为

$$G=2\times3700\times1.1\times1.2+1500\times1.4\times0.9=11658\text{N}$$

$$S_2=11658\frac{2.44}{2\times1.2}=11852\text{N}$$

横担其他杆件的内力计算可参见本章第五节。

（八）叉梁计算

正常情况所有水平力对零力矩点的力矩和为

$$\sum M_0=(2\times1370\times13.04+3\times2850\times10.44+2\times125\times13.04\times5.92)\times1.4=202007\text{N}\cdot\text{m}$$

由图 8-163 得叉梁轴线长度 $l=\sqrt{4.25^2+6.8^2}$ =

8.0m， $\cos\theta=\dfrac{4.25}{8}=0.53125$，叉梁轴向力为

$$N=0.55\times\frac{202007}{6.8\times0.53125}=30755\text{N}$$

采用 $b\times h$=14×16cm 叉梁，C25 级混凝土，配 4ϕ10，HPB300 钢筋。f_c=1190N/cm²，f'=27000N/cm²，A=224cm²，A_s=3.14cm²。

扣去主杆直径和抱箍距离后，叉梁实长约为 720cm，叉梁计算长度为 720cm 时的长细比为

$$\lambda=\frac{0.7\times720}{\sqrt{16^2/12}}=110\text{，查表弯曲系数 }\varphi_c=48$$

叉梁按轴心受压计算：

$$\rho=\frac{A_s}{A}=\frac{3.14}{224}=0.014<3\%$$

$N=0.9\times0.48\times(1190\times224+27000\times3.14)=$ $151779\text{N}>30755\text{N}$，满足承载力要求。

叉梁抱箍一般均可按构造设计，计算略。

三、钢管杆计算

（一）设计条件

（1）电压等级及回路数：110kV；双回路。

（2）导线、地线牌号：LGJ-240/40、GJ-50。

（3）设计档距：水平 $l_h=250\text{m}$；垂直 $l_v=300\text{m}$。

（4）气象条件：V_{max}=25m/s；覆冰厚度 t=10mm；最高温度 t=40℃。

（5）主杆采用八边形。

（6）点 A-1 段点 A 半径 $R_A=22.5\text{cm}$，$t=0.6\text{cm}$

点 1 半径 $R_1=30.75\text{cm}$　$t=0.6\text{cm}$

点 1-3 段点 3 半径 $R_3=36.15\text{cm}$　$t=1.0\text{cm}$

点 3-5 段点 5 半径 $R_5=41.5\text{cm}$　$t=1.0\text{cm}$

点 5-7 段点 7 半径 $R_7=48.0\text{cm}$　$t=1.0\text{cm}$

（二）荷载组合

钢管杆设计荷载组合见图 8-167。

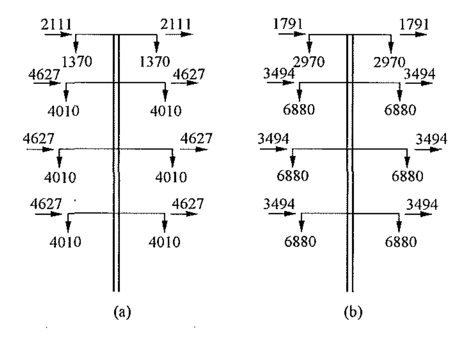


图 8-167　钢管杆设计荷载组合图（一）

（a）大风工况；（b）覆冰工况

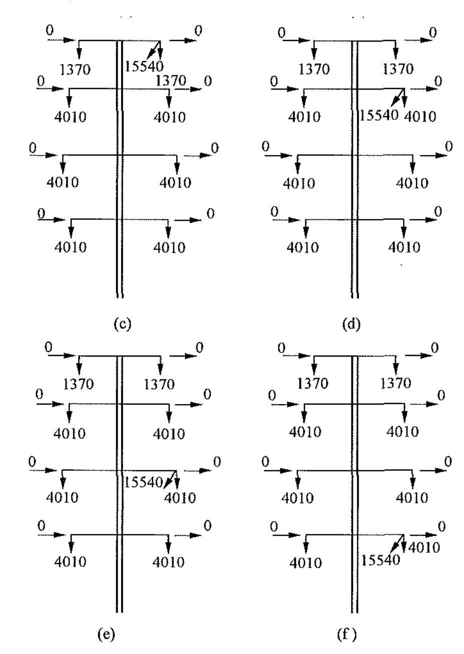


图 8-167　钢管杆设计荷载组合图（二）

（c）断地线工况；（d）断上导线工况；（e）断中导线工况；（f）断下导线工况

（三）单线图

钢管杆计算单线图如图 8-168 所示。

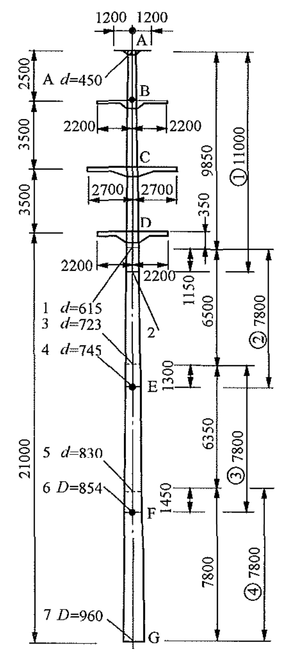


图 8-168　钢管杆计算单线图

（四）塔身风压计算

1. 点 A-1 段（按图编号）

v=25m/s 时，则 $W_0=\dfrac{25^2}{1600}$，$\mu_z=1.35$（按B类），

$\mu_s=1.2$（八边形）， $\beta_Z=1.255$ ， $D=0.5325\text{m}$ ， $h_{cp}=25.6\text{m}$

$$W_s=\frac{25^2}{1600}\times1.35\times1.2\times1.255\times0.5325=0.423\text{kN/m}$$

v=5m/s 时，则 $W_s'=0.423\times\dfrac{5^2}{25^2}=0.017\text{kN/m}$

2. 点 1-3 段

v=25m/s 时，则 $\mu_Z=1.2$，$\mu_s=1.2$，$\beta_Z=1.255$，$D=0.669\text{m}$，$h_{cp}=17.4\text{m}$

$$W_{s(1-3)}'=\frac{25^2}{1600}\times1.2\times1.255\times1.0\times0.669=0.394\text{kN/m}$$

v=5m/s 时，则 $W_{s(1-3)}'=0.394\times\dfrac{5^2}{25^2}=0.016\text{kN/m}$

3. 点 3-5 段

v=25m/s 时，则 $\mu_Z=1.07$，$\mu_s=1.2$，$\beta_Z=1.255$，$D=0.7765\text{m}$，$h_{cp}=10.975\text{m}$

$$W_{s(3-5)}=\frac{25^2}{1600}\times1.07\times1.2\times1.255\times0.7765=0.489\text{kN/m}$$

v=5m/s 时，则 $W_{s(3-5)}'=0.489\times\dfrac{5^2}{25^2}=0.02\text{kN/m}$

4. 点 5-7 段

v=25m/s 时，则 $h_{cp}<10\text{m}$，$\mu_Z=1.0$，$\mu_s=1.2$，$\beta_Z=1.255$，$D=0.895\text{m}$

$$W_{s(5-7)}'=\frac{25^2}{1600}\times1.0\times1.2\times1.255\times0.895=0.527\text{kN/m}$$

v=5m/s 时，则 $W_{s(5-7)}'=0.527\times\dfrac{5^2}{25^2}=0.021\text{kN/m}$

（五）杆身各截面弯矩及轴向压力设计值计算

由荷载组合图可以判断 90° 正常大风为弯矩最大。

B 点：

$$M_B=\left(2.111\times2\times2.5+0.423\times\frac{2.5^2}{2}\right)\times1.4$$
$$=16.63\text{kN}\cdot\text{m}=1663000\text{N}\cdot\text{cm}$$

$N_B=(1.37+4.010)\times2\times1.2=12.91\text{kN}$（省略杆自重）

C 点：

$$M_C=\left(2.111\times2\times6+4.627\times2\times3.5+0.423\times\frac{6^2}{2}\right)\times1.4$$
$$=91.47\text{kN}\cdot\text{m}=9\,147000\text{N}\cdot\text{cm}$$

$$N_C=(2\times1.37+4\times4.010)\times1.2=22.54\text{kN}$$

1 点：

$$M_1=\left[2.111\times2\times9.85+4.627\times2\times(7.35+3.85+0.35)+0.423\times\frac{9.85^2}{2}\right]\times1.4=236.587\text{kN}\cdot\text{m}$$

$$N_1=(2\times1.37+6\times4.010)\times1.2=32.16\text{kN}$$

3 点：

$$M_3=\left[2.111\times2\times16.35+4.627\times2\times(13.85+10.35+6.85)+0.423\times9.85\times\left(\frac{9.85}{2}+6.5\right)+0.394\times\frac{6.5^2}{2}\right]\times1.4$$
$$=577.21\text{kN}\cdot\text{m}$$

$$N_3=(2\times1.37+6\times4.010)\times1.2=32.16\text{kN}$$

5 点：

$$M_5=\left[2.111\times2\times22.7+4.627\times2\times(20.2+16.7+13.2)+0.423\times9.85\times\left(\frac{9.85}{2}+6.5+6.35\right)+0.394\times6.5\times\left(\frac{6.5}{2}+6.35\right)+0.489\times\frac{6.35^2}{2}\right]\times1.4$$
$$=935.2\text{kN}\cdot\text{m}$$

$$N_5=(2\times1.37+6\times4.010)\times1.2=32.16\text{kN}$$

7 点：

$$M_7=\left[2.111\times2\times30.5+4.627\times2\times(28+24.5+21)+0.423\times9.85\times\left(\frac{9.85}{2}+6.5+6.35+7.8\right)+0.394\times6.5\times\left(\frac{6.5}{2}+6.35+7.8\right)+0.489\times6.35\times\left(\frac{6.35}{2}+7.8\right)+0.527\times\frac{7.8^2}{2}\right]\times1.4$$
$$=1414.24\text{kN}\cdot\text{m}$$

$$N_7=(2\times1.37+6\times4.010)\times1.2=32.16\text{kN}$$

（六）多边形钢管局部稳定计算

本例题按八边形钢管杆进行主杆计算，其他各种不同边数只是计算查断面特性表中参数变化，就其计算方法是相同的。对某截面进行计算时，要先求其强度设计值，然后按多边形构件的压弯局部稳定计算公式，对该截面进行局部稳定计算，使其计算值不超过求出的强度设计值。

B 截面：

假定 $t=0.6\text{cm}$，则

$D_B=49.2\text{cm}$，$D=49.2-0.6=48.6\text{cm}$，

$W=0.414(D-t-2BR)=17.88\text{cm}$

$\dfrac{W}{t}=\dfrac{17.88}{0.6}=29.8<\dfrac{660}{\sqrt{f}}=\dfrac{660}{\sqrt{215}}=45$，Q235，$f=215\text{N/mm}^2$

由于 $\dfrac{W}{t}\leqslant\dfrac{660}{\sqrt{f}}=\dfrac{660}{\sqrt{215}}=45$，取 $f_a=f=215\text{N/mm}^2$。

按式（8-156）$\frac{N_2}{A_g}+\frac{M_y \cdot C_x}{I_y} \leqslant f_a$，计算

N_B、M_B 前面已求出，再按表 8-49 求 A_g、I_y、C_x，将数值代入公式即可（$N_2=N_B$，$M_y=M_B$）：

$$A_g=3.32D\times t=3.32\times 48.6\times 0.6=96.81\text{cm}^2$$

$$I_y=0.438D^3\times t=0.438\times 48.6^3\times 0.6=30167.1\text{cm}^4$$

$$C_x=0.541(D+t)\cos 22.5°=24.59\text{cm}$$

η=1.10——考虑挠度二次效应影响，将弯矩增大。

将上述各值代入公式：

$$\frac{12910}{96.81}+\frac{1663000}{30167.1}\times 24.59\times 1.10=1624\text{N/cm}^2$$
$$=16.24\text{N/mm}^2<f_a$$

则 B 截面满足。

以同样的方法计算 C、D 截面，（C、D 截面计算从略）。

1 截面：

$D_1=61.5\text{cm}$，$t=0.6\text{cm}$，$D=60.9\text{cm}$，$W=23.0\text{cm}$

$\frac{W}{t}=\frac{23}{0.6}=38.3<\frac{660}{\sqrt{f}}$=45，则取 $f_a=f=215\text{N/mm}^2$

$$N_1=32160\text{N}，\quad M_1=23658700\text{N}\cdot\text{cm}$$

$$A_g=3.32D\times t=3.32\times 60.9\times 0.6=121.31\text{cm}^2$$

$$I_y=0.438D^3\times t=0.438\times 60.9^3\times 0.6=59357.72\text{cm}^4$$

$$C_x=30.74\text{cm}$$

η=1.10——考虑挠度二次效应影响，将弯矩增大。

将上述各值代入公式：

$$\frac{32160}{121.31}+\frac{23658700}{59357.72}\times 30.74\times 1.10=13742.6\text{N/cm}^2$$
$$=137.4\text{N/mm}^2<f_a$$

则第一杆段计算完毕。

以同样的方法计算 2、3、4 截面（2、3、4 截面计算从略）。

5 截面：

$D_5=83.0\text{cm}$，$t=1.0\text{cm}$，$D=82.0\text{cm}$，$W_s=30.22\text{cm}$

$$A_{g(5)}=272.24\text{cm}^2$$

$$I_{y(5)}=0.438D^3\times t=241499.2\text{cm}^4$$

$$C_x=0.541(D+t)\cos 22.5°=41.5\text{cm}$$

η=1.10——考虑挠度二次效应影响，将弯矩增大。

$\frac{W}{t}=\frac{30.22}{1.0}=30.22<\frac{660}{\sqrt{f}}=45$，则取

$$f_a=f=215\text{N/mm}^2$$

$$N_5=32160\text{N}，\quad M_5=93520000\text{N}\cdot\text{cm}$$

$$f_{a(5)}=\frac{N_5}{A_{g(5)}}+\frac{M_5\times c_{y(5)}}{I_{x(5)}}\times\eta=\frac{32160}{272.24}+\frac{93520000}{241499.2}\times 41.5\times 1.10=17796\text{N/cm}^2=177.96\text{N/mm}^2<f_a=215\text{N/mm}^2$$

7 截面：

$D_7=96\text{cm}$，$t=1.0\text{cm}$，$D=95.0\text{cm}$，$W_7=35.6\text{cm}$

$$A_{g(7)}=315.4\text{cm}^2$$

$$I_{y(7)}=375530.3\text{cm}^4$$

$$C_{x(7)}=0.541(D+t)\cos 22.5°=47.98\text{cm}$$

$\eta=1.10$——考虑挠度二次效应影响，将弯矩增大。

$\frac{W}{t}=\frac{35.6}{1.0}=35.6>\frac{660}{\sqrt{f}}=45$，则取$f_a=f=215\text{N/mm}^2$

$$N_7=32160\text{N}，\quad M_7=141424000\text{N}\cdot\text{cm}$$

$$f_7=\frac{32160}{315.4}+\frac{141424000}{375530.3}\times 47.98\times 1.10=19978.06\text{N/cm}^2$$
$$=199.8\text{N/mm}^2<f_a=215\text{N/mm}^2$$

则 7 截面的强度和稳定满足要求。

（七）杆顶挠度计算

气象条件：风速 v=5m/s，覆冰 $\delta=0$mm

地线风压：$F'_{H1}=2111\times 5^2/25^2=84.4\text{N}$

导线风压：$F'_{H2}=4627\times 5^2/25^2=185.1\text{N}$

计算挠度荷载简图，见图 8-169。

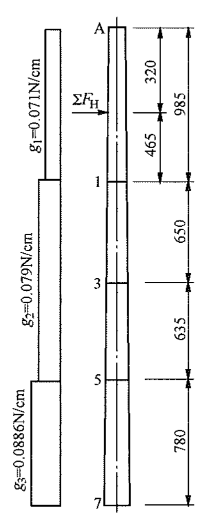


图 8-169　计算挠度荷载简图

因导线、地线均作用在第一段上，导线、地线的荷载（水平荷载）用合力 $\sum F_H$ 代替（简化计算）。

$$\sum F_H=F'_{H1}\times 2+F'_{H2}\times 6=84.4\times 2+185.1\times 6=1280\text{N}$$

合力的作用点为

$$h=\frac{84.4\times 2\times 30.5+185.1\times 2\times(21+24.5+28)}{1280}$$
$$=25.3\text{m}=2530\text{cm}$$

为简化计算，把第 2、第 3 段同一壁厚作为一段，这就变成了三段。挠度计算公式见表 8-50。

第一段挠度计算，点 A～1，$t=0.6\text{cm}$。

$$f_{A1}=f_{AF_H}+f_{Aq}=\frac{F_H L_1^3}{EI_1}\left(\alpha_1+\frac{d}{L_1}\beta_1\right)+\frac{q_1 L^4}{EI_1}\alpha_3$$

在 $F_H=\sum F_H$ 集中水平力作用下，先求出 n 值：

$$n=\left(R_A+\frac{R_1-R_A}{L}\times d\right)\Big/R_1$$
$$=\left(22.5+\frac{30.75-22.5}{985}\times 520\right)\Big/30.75=0.87$$

由 n 值，查表 8-51，得 $\alpha_1=0.3696$，$\beta_1=0.5747$。（表 8-50、表 8-51 均为在圆环形截面推导出来的公式，八边形已较接近圆形，在暂无多边形公式的情况下，可近似使用）

$$EI_1=2.06\times10^7\times0.438D_1^3\times t$$
$$D_0=2\times30.75\times\cos22.5°=56.82\text{cm}$$

$D=D_0-t=56.82-0.6=56.22\text{cm}$，将 $D_1=D=56.22$，$t=0.6$ 值代入 EI_1 式，$EI_1=2.06\times10^7\times0.438\times56.22^3\times0.6=0.961978\times10^{12}\text{N}\cdot\text{cm}^2$

在 q 作用下，$n=R_A/R_1=22.5/30.75=0.73$

查表 8-51 得 $\alpha_3=0.1498$，$\beta_3=0.2098$

$$f_{A1}=\frac{1280\times465^3}{0.961978\times10^{12}}\times\left(0.3696+\frac{520}{465}\times0.5747\right)+\frac{0.071\times985^4}{0.961978\times10^{12}}\times0.1498$$
$$=0.1354+0.0104=0.1458\text{cm}$$

第二段挠度计算，点 1～5，$t=1.0\text{cm}$。

点 1～5 作用在 1 点的荷载为

$$F_H=1280+0.071\times985=1350\text{N}，\quad L=1285\text{cm}$$
$$M=1280\times465+0.071\times985^2/2=629643\text{N}\cdot\text{cm}$$
$$EI_5=2.06\times10^7\times0.438\times D_5^3\times t$$

式 中 $D_5=2\times41.5\times\cos22.5°-1.0=79.17\text{cm}$，$\delta=1.0\text{cm}$，则 $EI_5=2.06\times10^7\times0.438\times79.17^3\times1.0=4.477\times10^{12}\text{N}\cdot\text{cm}^2$

$n=30.75/41.5=0.74$，查表 8-51 得

$$\alpha_1=0.4156\alpha_2=0.6757\alpha_3=0.1487$$
$$\beta_1=0.6757\beta_2=1.5888\beta_3=0.2078$$

$$f_{A2}=\frac{F_H L^3}{EI_5}\alpha_1+\frac{ML^2}{EI_5}\alpha_2+\frac{qL^4}{EI_5}\alpha_3=\frac{1350\times1285^3}{4.477\times10^{12}}\times0.4156+\frac{629643\times1285^2}{4.477\times10^{12}}\times0.6757+\frac{0.079\times1285^4}{4.477\times10^{12}}\times0.1487$$
$$=0.2659+0.1569+0.0072=0.43\text{cm}$$

第三段挠度计算，点 5～7，$t=1.0\text{cm}$。

点 5～7 作用在 5 点的荷载：

$$F_{H5}=1350+0.079\times1285=1452\text{N}$$
$$M_5=60672000\times5^2/25^2=2426880\text{N}\cdot\text{cm}$$
$$EI_7=2.06\times10^7\times0.438\times D_7^3\times t$$

式中 $D_7=2\times48\times\cos22.5°-1.0=91.729\text{cm}$，$\delta=1.0\text{cm}$

则

$$EI_7=2.06\times10^7\times0.438\times91.729^3\times1.0=6.964\times10^{12}\text{N}\cdot\text{cm}^2$$

$n=0.415/0.48=0.86$，查表 8-51 得

$$\alpha_1=0.3728\alpha_2=0.5814\alpha_3=0.1366$$
$$\beta_1=0.5814\ \beta_2=1.2574\ \beta_3=0.1864$$

$$f_{A3}=\frac{1452\times780^3}{6.964\times10^{12}}\times0.3728+\frac{2426880\times780^2}{6.964\times10^{12}}\times0.5814+\frac{0.0886\times780^4}{6.964\times10^{12}}\times0.1366$$
$$=0.0369+0.1233+0.0006=0.1608\text{cm}$$

第 1 点的转角

$$\theta_1=\frac{F_{H1}L^2}{EI_5}\beta_1+\frac{M_1 L}{EI_5}\beta_2+\frac{qL^3}{EI_5}\beta_3=\frac{1350\times1285^2}{4.477\times10^{12}}\times0.6757+\frac{629643\times1285}{4.477\times10^{12}}\times1.5888+\frac{0.079\times1285^3}{4.477\times10^{12}}\times0.2078$$
$$=0.00034+0.00029+0.0000078=0.00064$$

第 5 点的转角

$$\theta_5=\frac{F_{H5}L^2}{EI_7}\beta_1+\frac{M_5 L}{EI_7}\beta_2+\frac{q_3 L^3}{EI_7}\beta_3=\frac{1452\times780^2}{6.964\times10^{12}}\times0.5814+\frac{2426880\times780}{6.964\times10^{12}}\times1.2574+\frac{0.0886\times780^3}{6.964\times10^{12}}\times0.1864$$
$$=0.000074+0.000342+0.0000011=0.00042$$

A 点总挠度

$$f_A=0.1458+0.43+0.1608+0.00064\times985+0.00042\times(985+1285)=2.3204\text{cm}$$

则：$f_A/H=2.32/3050=0.000761\approx0.1\%<0.5\%$ 满足要求。

（八）横担计算

钢管杆用于城市或重要场所时，不得采用转动横担。

横担如采用工字型或箱型截面时，截面特性参照

本手册第十五章第五节。

横担计算部分从略。

（九）底法兰计算

钢管杆的底法兰计算参照本章第九节。

四、自立式铁塔计算

（一）铁塔外形与荷载

本例为 500kV 单回路干字型角钢耐张塔，其外形如图 8-170 所示，导地线及附属构件荷载标准值见表 8-79。

表 8-79　导地线及附属构件荷载标准值

塔型	呼称高（m）	转角（°）	标准档距（m）	水平档距（m）	垂直档距（m）	最大档距（m）	前侧代表档距（m）
J1	24	20	400	320	260	500	200
气象条件		覆冰	最大风	最低温	安装	断线	不平衡覆冰
温度（℃）		−5	−5	−40	−15	−5	−5
冰厚（mm）	导线	10	0	0	0	10	10
	地线	15	0	0	0	15	15
风速（m/s）		10	33.6	0	10	0	10
水平荷载（N）							
导线		6198	25185	0	2974	0	6198
绝缘子串		306	2879	0	255	0	306
间隔棒防振锤等		12	113	0	10	0	12
共计		6516	28177	0	3239	0	6516
每相跳线挂点		636	2996	0	335	0	636
每相地线		1517	3648	0	426	0	1517
垂直荷载（N）							
导线		33836	21206	21206	21206	33836	30678
绝缘子串		39305	35304	35304	35304	39305	39305
间隔棒、防振锤等		2966	2730	2730	2730	2966	2966
共计		76107	59240	59240	59240	76107	72949
每相跳线挂点		7533	5193	5193	5193	7533	7557
每相地线		7129	3345	3345	3345	7129	6242
张力（N）							
每相导线	前侧	208288	184372	202956	174280	145802	62486
	后侧	181596	165600	163268	146664		
每相地线	前侧	45387	34700	37700	35365	45387	18155
	后侧	38628	32288	30801	27516		

注　1. 前后侧水平及垂直荷载 3:7 分配。

2. 高空风压系数：导线边相，1.011；导线中相，1.11；地线，1.15。

3. 输电线路铁塔基准高度 10m，风速 30m/s。

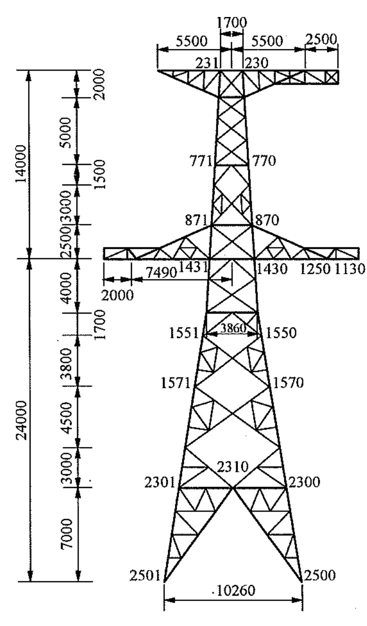


图 8-170 铁塔外形

（二）塔身风及自重荷载计算

90°大风工况下，分别选取 230-770 段塔身和 1250-1430-870 段横担作为示例计算其塔身风压及自重荷载。

1. 230-770 段塔身风压及自重荷载计算

（1）风压计算。根据统计 230-770 段塔身侧面迎风面构件的投影面积 A_s=3.419m^2；230-770 段塔身侧面的轮廓面积 A=14.84m^2；由辅助材和节点板等导致的挡风面积增大系数取 1.25；本段的对地距离取 34.5m；本段迎风面宽度和背风面宽度均取 2.12m。

杆塔风荷载标准值按式（8-14）计算，有

$$w_s = w_0\mu_z\mu_s B_2 A_s\beta_z$$

根据角度风作用时风荷载分配表（见表 8-21），90°风垂直于塔身侧面吹时，塔身承受 X 方向的风荷载标准值即为 w_s，承受 Y 方向的风荷载为 0。

基准风压标准值 $w_0 = \dfrac{v^2}{1600} = \dfrac{30^2}{1600} = 0.5625\text{kN/m}^2$

根据 2012 版建筑结构荷载规范，考虑地面粗糙度类别为 B 类，风压高度变化系数 $\mu_z = \left(\dfrac{34.5}{10}\right)^{0.3} = 1.45$

根据表 8-20，角钢塔桁架的体型系数 $\mu_s = 1.3\times(1+\eta)$，桁架的挡风系数 $\phi = A_s / A = 3.419\times1.25 / 14.84 = 0.288$，$b/h=1$，查表后按插入法计算得 $\eta = 0.683$，所以 $\mu_s = 1.3(1+0.683) = 2.188$。

构件覆冰风荷载增大系数 $B_2 = 1.0$。

本塔全高 38m，根据表 8-18，杆塔风荷载调整系数 $\beta_z = 1.33$。

本段风荷载标准值为

$$w_s = 0.5625\times1.45\times2.188\times3.419\times1.25\times1.33 = 10.144\text{kN}$$

本段风荷载设计值为

$$w_d = \gamma_Q \cdot w_s = 1.4\times10.144 = 14.20\text{kN}$$

（2）自重荷载计算。本段计算构件累加的质量是 1.059t，考虑辅助材和节点板等导致的自重增大，系数取 1.2。

本段自重荷载设计值为

$$G_w = \gamma_G\times1.059\times1.2\times9.8 = 1.2\times1.059\times1.2\times9.8 = 14.945\text{kN}$$

（3）节点荷载分配。塔身风压及自重荷载一般考虑平均加载到塔身棱台的八个角点上。本段塔身风压及自重荷载将加载到 230、231、232、233、770、771、772 及 773 八个节点上，每个节点承受的荷载为：F_x=1.78kN，F_y=0kN，F_z=1.87kN。

2. 1250-1430-870 段横担风压及自重荷载计算

（1）风压计算。根据统计 1250-1430-870 段横担正面迎风面构件的投影面积 A_s=2.625m^2；1250-1430-870 段横担正面的轮廓面积 A=6.888m^2；由辅助材和节点板等导致的挡风面积增大系数取 1.3；本段的对地距离取 24.8m；本段迎风面宽度取 3.67m，迎风面与背风面之间距离取 3.28m。

根据角度风作用时风荷载分配表（见表 8-21），90°风垂直于横担侧面吹时，横担承受 X 方向的风荷载标准值为 0.4 w_s（w_s 为风垂直于横担正面吹时，横担风荷载标准值），承受 Y 方向的风荷载为 0。

杆塔风荷载标准值按式（8-14）计算，有

$$w_s = w_0\mu_z\mu_s B_2 A_s\beta_z$$

基准风压标准值

$$w_0 = \frac{v^2}{1600} = \frac{30^2}{1600} = 0.5625\text{kN/m}^2$$

根据 2012 版建筑结构荷载规范，考虑地面粗糙度类别为 B 类，风压高度变化系数

$$\mu_z = \left(\frac{24.8}{10}\right)^{0.3} = 1.313$$

根据表 8-20，角钢塔桁架的体型系数 $\mu_s = 1.3\times(1+\eta)$，桁架的挡风系数 $\phi = A_s / A = 2.625\times1.3 / 6.888 = 0.495$，$b/h = 3.28/3.67 = 0.89$，查表后按插入法计算得 $\eta = 0.33$，所以 $\mu_s = 1.3\times(1+0.33) = 1.729$。

构件覆冰风荷载增大系数 $B_2 = 1.0$

本塔全高 38m，根据表 8-18，杆塔风荷载调整系数 $\beta_z = 1.33$

本段风荷载标准值为

$$w_s = 0.5625\times1.313\times1.729\times2.625\times1.3\times1.33 = 5.796\text{kN}$$

本段风荷载设计值为

$w_d=\gamma_Q\times0.4\times w_s=1.4\times0.4\times5.796=3.246\text{kN}$

（2） 自重荷载计算。本段计算构件累加的质量是 1.521t，考虑辅助材和节点板等导致的自重增大系数取 1.3。

本段自重荷载设计值为

$$G_w=\gamma_G\times1.521\times1.3\times9.8=1.2\times1.521\times1.3\times9.8=23.253\text{kN}$$

（3） 节点荷载分配。横担风压及自重荷载一般考虑平均加载到横担空间立体图形的各个角点上。本段横担风压及自重荷载加载到 1250、1252、1430、1432、870 及 872 六个节点上，每个节点承受的荷载为：F_x=0.54kN，F_y=0kN，F_z=3.88kN。

注意，处于各段交接的加载节点，其作用的荷载应为各段风压及自重荷载平均分配后的累加值。

（三）导线挂点荷载计算

选取 90°大风有张力差工况、覆冰有张力差工况、挂右导线工况（左导线已挂）、断左右导线工况及不均匀冰最大弯工况作为示例，计算右导线节点荷载。

1. 90°大风有张力差工况

（1） X 方向荷载计算。

1250 节点和 1130 节点 X 方向设计荷载为

$$F_{b,X}=(28.177\times1.011\times1.2\times0.7+184.372\times\sin10°)\times1.4\times0.5=39.16\text{kN}$$

1.2 为导地线风荷载调整系数；0.7 为前侧导线挂点风荷载分配系数；1.4 为可变荷载分项系数；0.5 是考虑前侧两个导线挂点，每挂点承受一半的荷载。

1252 节点和 1132 节点 X 方向设计荷载为

$$F_{a,X}=(28.177\times1.011\times1.2\times0.3+165.6\times\sin170°)\times1.4\times0.5=27.31\text{kN}$$

（2） Y 方向荷载计算。

1250 节点和 1130 节点 Y 方向设计荷载为

$$F_{b,Y}=184.372\times\cos10°\times1.4\times0.5=127.10\text{kN}$$

1252 节点和 1132 节点 Y 方向设计荷载为

$$F_{a,Y}=165.6\times\cos170°\times1.4\times0.5=-114.16\text{kN}$$

$F_{a,Y}<0$ 表示节点的受力方向与 Y 坐标方向相反。

（3） Z 方向荷载计算。

1250 节点和 1130 节点 Z 方向设计荷载为

$$F_{b,Z}=59.24\times1.2\times0.7\times0.5=24.88\text{kN}$$

1.2 为永久荷载分项系数。

1252 节点和 1132 节点 Z 方向设计荷载为

$$F_{a,Z}=59.24\times1.2\times0.3\times0.5=10.66\text{kN}$$

2. 覆冰有张力差工况

（1） X 方向荷载计算。

1250 节点和 1130 节点 X 方向设计荷载为

$$F_{b,X}=(6.516\times1.011\times0.7+208.288\times\sin10°)\times1.4\times0.5=28.55\text{kN}$$

1252 节点和 1132 节点 X 方向设计荷载为

$$F_{a,X}=(6.516\times1.011\times0.3+181.596\times\sin170°)\times1.4\times0.5=23.46\text{kN}$$

（2） Y 方向荷载计算。

1250 节点和 1130 节点 Y 方向设计荷载为

$$F_{b,Y}=208.288\times\cos10°\times1.4\times0.5=143.59\text{kN}$$

1252 节点和 1132 节点 Y 方向设计荷载为

$$F_{a,Y}=181.596\times\cos170°\times1.4\times0.5=-125.19\text{kN}$$

（3） Z 方向荷载计算。

1250 节点和 1130 节点 Z 方向设计荷载为

$$F_{b,Z}=\left[(76.107-59.24)\times1.4+59.24\times1.2\right]\times0.7\times0.5=33.15\text{kN}$$

1252 节点和 1132 节点 Z 方向设计荷载为

$$F_{a,Z}=\left[(76.107-59.24)\times1.4+59.24\times1.2\right]\times0.3\times0.5=14.21\text{kN}$$

3. 挂右导线工况（左导线已挂）

挂线工况时，只计算前侧挂点荷载，后侧挂点荷载均为 0。

（1） X 方向荷载计算。

考虑 1130 节点有临时拉线平衡安装张力 30kN，1130 节点 X 方向设计荷载为

$$F_{b,X1}=[3.239\times1.011\times0.35+(1.1\times0.5\times174.28-30)\times\sin10°]\times1.4\times0.9=15.85\text{kN}$$

0.35 是考虑前侧每挂点承受风荷载的比例；1.1 是动力系数（正锚时取 1.1，已锚好时取 1.0）；0.5 是考虑前侧两个导线挂点，每挂点承受一半的张力；0.9 是可变荷载组合系数。

1250 节点没有临时拉线，1250 节点 X 方向设计荷载为

$$F_{b,X2}=(3.239\times1.011\times0.35+1.1\times0.5\times174.28\times\sin10°)\times1.4\times0.9=22.42\text{kN}$$

（2） Y 方向荷载计算。

1130 节点 Y 方向设计荷载为

$$F_{b,Y1}=(1.1\times0.5\times174.28-30)\cos10°\times1.4\times0.9=81.72\text{kN}$$

1250 节点 Y 方向设计荷载为

$$F_{b,Y2}=1.1\times0.5\times174.28\times\cos10°\times1.4\times0.9=118.94\text{kN}$$

（3） Z 方向荷载计算。

1130 节点 Z 方向设计荷载为

$$F_{b,Z1}=59.24\times0.35\times1.2+(30\times\tan45°+6)\times1.4\times0.9=70.24\text{kN}$$

临时拉线的对地夹角取 45°；安装附加荷载取 6kN。

1250 节点 Z 方向设计荷载为

$$F_{b,Z2}=59.24\times0.35\times1.2+6\times1.4\times0.9=32.44\text{kN}$$

4. 断左右导线工况

导线是分裂导线，因此断导线，实际是考虑导线的前后侧有纵向不平衡张力。

（1） X 方向荷载计算。

1250 节点和 1130 节点 X 方向设计荷载为

$$F_{b,X}=208.288\times\sin10°\times1.4\times0.9\times0.5=22.79\text{kN}$$

1252 节点和 1132 节点 X 方向设计荷载为

$$F_{a,X}=(208.288-145.802)\times\sin170°\times1.4\times0.9\times0.5=6.84\text{kN}$$

（2） Y 方向荷载计算。

1250 节点和 1130 节点 Y 方向设计荷载为

$$F_{b,Y}=208.288\times\cos10°\times1.4\times0.9\times0.5=129.23\text{kN}$$

1252 节点和 1132 节点 Y 方向设计荷载为

$$F_{a,Y}=(208.288-145.802)\times\cos170°\times1.4\times0.9\times0.5=-38.77\text{kN}$$

（3） Z 方向荷载计算。

1250 节点和 1130 节点 Z 方向设计荷载为

$$F_{b,Z}=\left[(76.107-59.24)\times1.4\times0.9+59.24\times1.2\right]\times0.7\times0.5=32.32\text{kN}$$

1252 节点和 1132 节点 Z 方向设计荷载为

$$F_{a,Z}=\left[(76.107-59.24)\times1.4\times0.9+59.24\times1.2\right]\times0.3\times0.5=13.85\text{kN}$$

5. 不均匀冰最大弯工况

（1） X 方向荷载计算。

1250 节点和 1130 节点 X 方向设计荷载为

$$F_{b,X}=(6.516\times1.011\times0.7+208.288\times\sin10°)\times1.4\times0.9\times0.5=25.69\text{kN}$$

1252 节点和 1132 节点 X 方向设计荷载为

$$F_{a,X}=[6.516\times1.011\times0.3+(208.288-62.486)\times\sin170°]\times1.4\times0.9\times0.5=17.20\text{kN}$$

（2） Y 方向荷载计算。

1250 节点和 1130 节点 Y 方向设计荷载为

$$F_{b,Y}=208.288\times\cos10°\times1.4\times0.9\times0.5=129.23\text{kN}$$

1252 节点和 1132 节点 Y 方向设计荷载为

$$F_{a,Y}=(208.288-62.486)\times\cos170°\times1.4\times0.9\times0.5=-90.46\text{kN}$$

（3） Z 方向荷载计算。

1250 节点和 1130 节点 Z 方向设计荷载为

$$F_{b,Z}=\left[(72.949-59.24)\times1.4\times0.9+59.24\times1.2\right]\times0.7\times0.5=30.93\text{kN}$$

1252 节点和 1132 节点 Z 方向设计荷载为

$$F_{a,Z}=\left[(72.949-59.24)\times1.4\times0.9+59.24\times1.2\right]\times0.3\times0.5=13.25\text{kN}$$

（四）杆件选材计算

建立铁塔计算模型，加载节点荷载后，软件将分析杆件内力，关于铁塔内力分析软件的原理及方法详见本章第四节。本算例中，将选取几根典型杆件进行选材计算。

1. 塔腿主材 2300-2500 选材计算

双面连接主材；杆件长度为 7177mm，平均分为 4 个节间；最大压力为 1196kN，最大拉力为 897kN；拟选用 Q345L180×14 角钢，截面积为 4889.6mm^2。

（1）长细比计算。

计算长度 L=7177/4=1794.3mm；计算回转半径 r_{y0}=35.7mm。

$$\lambda=L/r_{y0}=1794.3/35.7=50.26$$

根据表 8-62，受压构件长细比修正系数 K 取 1。

$K\lambda=50.26<150$ 满足要求。

（2） 受压稳定计算。

$$K\lambda\sqrt{\frac{f_y}{235}}=50.26\sqrt{\frac{345}{235}}=60.9$$

根据表 8-61，可查出 $\varphi=0.803$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{\lim}=(10+0.1\lambda)\sqrt{\frac{235}{f_y}}=(10+0.1\times50.26)\sqrt{\frac{235}{345}}=12.4$$

根据图 8-104，$\dfrac{b}{t}=\dfrac{180-14-16}{14}=10.71$

按式（8-159），当 $\dfrac{b}{t}<\left(\dfrac{b}{t}\right)_{\lim}$ 时，m_N=1.0

按式（8-158）进行轴心受压构件的稳定计算，有

$$N/(\varphi A)=1196\times10^3/(0.803\times4889.6)=304.6\text{N/mm}^2$$

$$m_N f=310\text{N/mm}^2$$

$N/(\varphi A)<m_N f$ 满足要求。

（3） 受压强度计算。

按式（8-156）进行轴心受压构件的强度计算

考虑角钢截面上有 2 个螺栓减孔，$A_n=4889.6-2\times25.5\times14=4175.6\text{mm}^2$

根据表 8-56，m=1.0

$$N/A_n=1196\times10^3/4175.6=286.4\text{N/mm}^2$$

$$mf=310\text{N/mm}^2$$

$N/A_n<mf$ 满足要求。

（4） 受拉强度计算。

按式（8-156）进行轴心受拉构件的强度计算。

考虑受拉构件的锯齿形破坏，考虑截面上有2.23个螺栓减孔。

$$A_n = 4889.6 - 2.23\times25.5\times14 = 4093.5\text{mm}^2$$

根据表8-55，m=1.0

$$N/A_n = 897\times10^3/4093.5 = 219.1\text{N/mm}^2$$

$$mf = 310\text{N/mm}^2$$

$N/A_n < mf$ 满足要求。

2. 腿部斜材2310-2500选材计算

单面连接腿部斜材；杆件长度为8751mm，平均分为4个节间；最大压力为115kN，最大拉力为106kN；拟选用Q345L100×7角钢，截面积为1379.6mm²。

（1）长细比计算。

根据表8-67注解，塔腿斜材计算长度应乘以1.2增大系数。

本杆件计算长度 L=8751×1.2/4=2625.3mm；计算回转半径 r_{y0}=19.9mm。

$$\lambda = L/r_{y0} = 2625.3/19.9 = 131.92$$

根据表8-62，考虑腿部斜材两端无约束，受压构件长细比修正系数 K 取1。

$K\lambda$=131.92＜200 满足要求。

（2）受压稳定计算。

$$K\lambda\sqrt{\frac{f_y}{235}} = 131.92\sqrt{\frac{345}{235}} = 159.8$$

根据表8-61，可查出 $\varphi = 0.276$

当 $\lambda > 100$ 时，取 $\lambda = 100$。

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{\lim} = (10+0.1\lambda)\sqrt{\frac{235}{f_y}} = (10+0.1\times100)\sqrt{\frac{235}{345}} = 16.5$$

根据图8-104，$\frac{b}{t} = \frac{100-7-12}{7} = 11.57$

按式（8-159），当 $\frac{b}{t} < \left(\frac{b}{t}\right)_{\lim}$ 时，m_N=1.0

按式（8-158）进行轴心受压构件的稳定计算，有

$$N/(\varphi A) = 115\times10^3/(0.276\times1379.6) = 302.0\text{N/mm}^2$$

$$m_N f = 310\text{N/mm}^2$$

$N/(\varphi A) < m_N f$ 满足要求。

（3）受压强度计算。

按式（8-156）进行轴心受压构件的强度计算

斜材考虑角钢截面上有1个螺栓减孔，

$$A_n = 1379.6 - 1\times21.5\times7 = 1229.1\text{mm}^2$$

根据表8-57，$m = 0.85$

$$N/A_n = 115\times10^3/1229.1 = 93.6\text{N/mm}^2$$

$$mf = 0.85\times310 = 263.5\text{N/mm}^2$$

$N/A_n < mf$ 满足要求。

（4）受拉强度计算。

按式（8-156）进行轴心受拉构件的强度计算

斜材考虑角钢截面上有1个螺栓减孔，

$$A_n = 1379.6 - 1\times21.5\times7 = 1229.1\text{mm}^2$$

根据表8-56，$m = 0.7$

$$N/A_n = 106\times10^3/1229.1 = 86.2\text{N/mm}^2$$

$$mf = 0.7\times310 = 217.0\text{N/mm}^2$$

$N/A_n < mf$ 满足要求。

3. 交叉斜材1550-1571选材计算

单面连接交叉斜材；杆件长度为6319mm，交叉点到1571节点长度为3897mm；最大压力为117kN，最大拉力为117kN；构件同时受压情况，杆件1550-1571压力为86kN，杆件1551-1570压力为27kN；拟选用Q345L100×8角钢，截面积为1563.9mm²。

（1）长细比计算。

根据表8-66序号2结构型式，非同时受压情况，杆件计算长度为

$L = 3897\times1.1 = 4286.7$mm；计算回转半径 r_x=30.8mm。

$$\lambda = L/r_x = 4286.7/30.8 = 139.2$$

根据表8-62，考虑交叉斜材两端无约束，受压构件长细比修正系数 K 取1。

$K\lambda$=139.2＜200 满足要求。

（2）受压稳定计算。

$$K\lambda\sqrt{\frac{f_y}{235}} = 139.2\sqrt{\frac{345}{235}} = 168.7$$

根据表8-61，可查出 $\varphi = 0.252$

当 $\lambda > 100$ 时，取 $\lambda = 100$。

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{\lim} = (10+0.1\lambda)\sqrt{\frac{235}{f_y}} = (10+0.1\times100)\sqrt{\frac{235}{345}} = 16.5$$

根据图8-104，$\frac{b}{t} = \frac{100-8-12}{8} = 10.0$

按式（8-159），当 $\frac{b}{t} < \left(\frac{b}{t}\right)_{\lim}$ 时，m_N=1.0

按式（8-158）进行轴心受压构件的稳定计算，有

$$N/(\varphi A) = 117\times10^3/(0.252\times1563.9) = 296.9\text{N/mm}^2$$

$$m_N f = 310\text{N/mm}^2$$

$N/(\varphi A) < m_N f$ 满足要求。

（3）受压强度计算。

按式（8-156）进行轴心受压构件的强度计算

斜材考虑角钢截面上有1个螺栓减孔，

$$A_n = 1563.9 - 1\times21.5\times8 = 1391.9\text{mm}^2$$

根据表8-56，$m = 0.85$

$$N/A_n = 117\times10^3/1391.9 = 84.1\text{N/mm}^2$$

$$mf = 0.85 \times 310 = 263.5\text{N/mm}^2$$

$N / A_n < mf$ 满足要求。

（4）受拉强度计算。

按式（8-156）进行轴心受拉构件的强度计算

斜材考虑角钢截面上有 1 个螺栓减孔，$A_n = 1563.9 - 1 \times 21.5 \times 8 = 1391.9\text{mm}^2$

根据表 8-56，$m = 0.7$

$$N / A_n = 117 \times 10^3 / 1391.9 = 84.1\text{N/mm}^2$$

$$mf = 0.7 \times 310 = 217.0\text{N/mm}^2$$

$N / A_n < mf$ 满足要求。

（5）同时受压情况构件选材计算。

a）同时受压情况长细比计算

按式（8-167），计算交叉斜材计算长度修正系数，有

$$K_2 = \sqrt{0.5(1 + 27/86)} = 0.81$$

根据表 8-66 序号 2 结构型式，同时受压情况，杆件计算长度为

$L = 0.81 \times 6319 = 5118.4\text{mm}$；计算回转半径 r_x=30.8mm。

$$\lambda = L/r_x = 5118.4/30.8 = 166.2$$

根据表 8-62，考虑交叉斜材两端无约束，受压构件长细比修正系数 K 取 1。

$K\lambda$=166.2＜250 满足要求。

b）同时受压情况受压稳定计算

$$K\lambda\sqrt{\frac{f_y}{235}} = 166.2\sqrt{\frac{345}{235}} = 201.4$$

根据表 8-61，可查出 $\varphi = 0.183$

当 $\lambda > 100$ 时，取 $\lambda = 100$。

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{\text{lim}} = (10 + 0.1\lambda)\sqrt{\frac{235}{f_y}} = (10+0.1\times100)\sqrt{\frac{235}{345}} = 16.5$$

根据图 8-104，$\dfrac{b}{t} = \dfrac{100 - 8 - 12}{8} = 10.0$

按式（8-159），当 $\dfrac{b}{t} < \left(\dfrac{b}{t}\right)_{\text{lim}}$ 时，m_{N}=1.0

按式（8-158）进行轴心受压构件的稳定计算，有

$$N/(\varphi A) = 86 \times 10^3 / (0.183 \times 1563.9) = 300.5\text{N/mm}^2$$

$$m_{\text{N}} f = 310\text{N/mm}^2$$

$N/(\varphi A) < m_{\text{N}} f$ 满足要求。

本例通过介绍铁塔计算模型与荷载、塔身风及自重荷载计算、导地线挂点荷载计算及杆件选材计算等内容，概述了铁塔设计的步骤和方法。因篇幅受限，只列举了典型荷载和杆件的计算，其他可参照上述计算。

第九章

基　础　设　计

输电线路的塔位沿线呈点状分布，地形地貌及地质情况复杂，基础往往在承受拉力和压力交替变化的荷载作用同时，也承受较大的水平荷载的作用。受地形、地质、运输等条件限制，山区大型施工设备和机具难以进入基础施工现场，从而使得一些地区主要还是靠人工施工，因此，基础设计时需考虑施工的实际情况。

目前，国内架空输电线路杆塔常用的基础型式主要有开挖回填类基础和原状土类基础两大类。开挖回填类基础主要包括直柱混凝土台阶式基础、直柱或斜柱钢筋混凝土板式基础、装配式基础、联合式基础和拉线基础等。原状土类基础主要包括掏挖基础（直掏挖、斜掏挖）、岩石基础、挖孔桩基础、螺旋锚基础、微型桩基础、灌注桩基础等，原状土基础由于减少了对土壤的扰动，能充分发挥地基土的承载性能，可大幅度地节约基础材料和施工费用，因此，在输电线路工程中被广泛应用。

影响输电线路基础设计的主要因素包括地质条件及基础作用力。基础作用力一般包括上拔力、下压力、水平力及倾覆力矩。基础设计（包括地脚螺栓、插入角钢设计）时，基础作用力计算应计入杆塔风荷载调整系数。当杆塔全高不超过 60m 时，杆塔风荷载调整系数应取 1.0。当杆塔全高超过 60m 时，宜采用由下到上逐段增大的数值，但其加权平均值对自立式铁塔不应小于 1.3。

对于特高压线路可按 GB 50790—2013《±800kV 直流架空输电线路设计规范》及 GB 50665—2011《1000kV 架空输电线路设计规范》选取风荷载调整系数。

基础稳定、基础承载力应采用荷载的设计值进行计算；地基的不均匀沉降、基础位移等应采用荷载的标准值进行计算。对于灌注桩、挖孔桩等桩基应按 JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》的要求进行计算。

第一节　基础上拔稳定计算

普通基础包括开挖回填类基础和掏挖扩底类基础两种类型。通常设计该型基础时，首先以上拔稳定条件确定基础外形，再进行地基和基础的强度计算。

普通基础的上拔稳定计算，按抗拔土体的状态可分别采用适用于原状抗拔土体的剪切法和适用于回填抗拔土体的土重法进行计算。原状抗拔土体，系指处于天然结构状态的黏性土和经夯实达到天然状态密实度的砂类回填土。适用于剪切法计算的主要基础型式为掏挖基础，如图 9-1 所示。适用于土重法计算的主要基础型式有装配式、台阶式、板式和拉线基础，如图 9-2 所示。

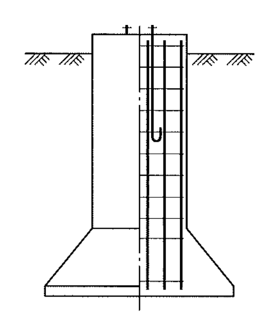


图 9-1　适于剪切法的基础型式

一、适用条件

（1）剪切法适用于：

基础埋深与圆形底板直径之比（h_t/D）不大于 4 的非松散砂类土；基础埋深与圆形底板直径之比（h_t/D）不大于 3.5 的黏性土。

（2）土重法适用于：

基础埋深与圆形底板直径之比（h_t/D）不大于 4、与方形底板边长之比（h_t/B）不大于 5 的非松散砂类土；基础埋深与圆形底板直径之比（h_t/D）不大于 3.5、与方形底板边长之比（h_t/B）不大于 4.5 的黏性土。

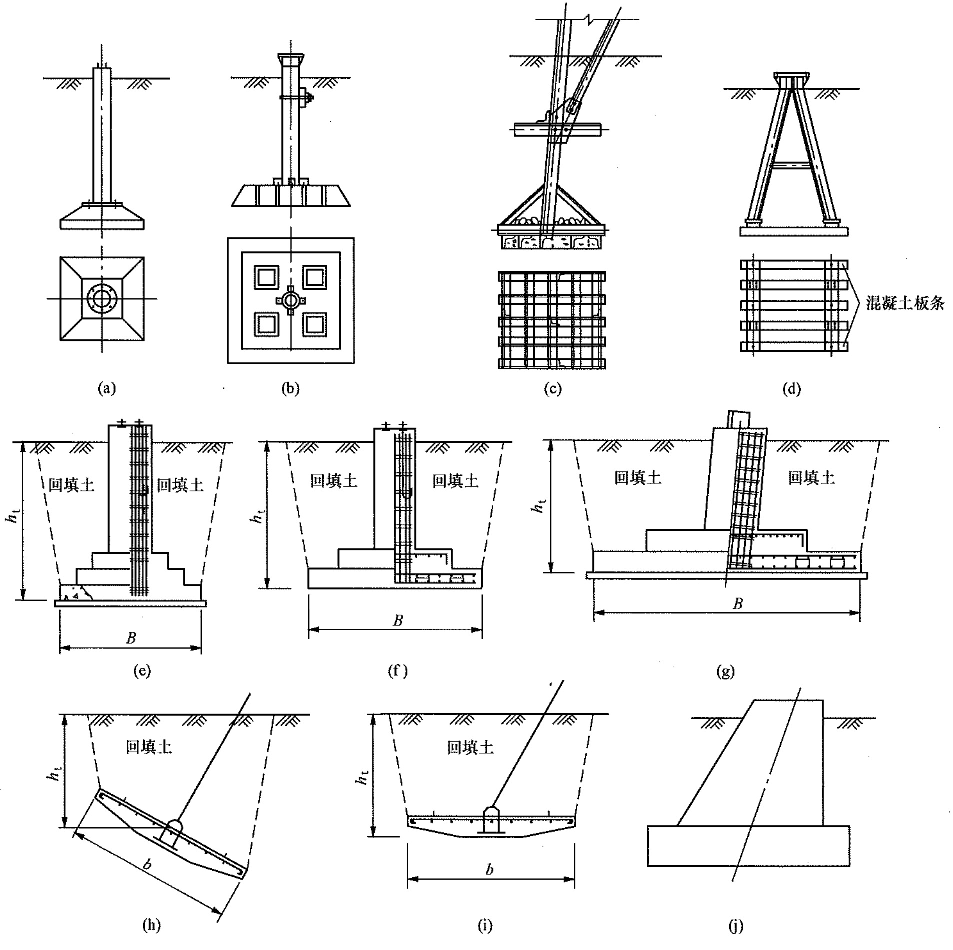


图 9-2 适于土重法的基础型式

（a）直柱固接型；（b）直柱铰接型；（c）金属基础；（d）金属支架型；（e）直柱混凝土台阶式基础；（f）直柱钢筋混凝土板式基型；（g）斜柱钢筋混凝土板式基型；（h）斜放式预制拉线基础；（i）平放式预制拉线基础；（j）拉线基础

拉线盘换算成圆形底板可按下式计算

$$D = 0.6(b + l)$$

式中 b ——宽度；

l ——长度。

二、基础的埋置深度

杆塔基础的埋置深度对杆塔的运行安全、施工进度和工程造价等均有很大影响。基础设计时，基础的埋深应考虑以下因素：

1. 作用于地基上的荷载大小和性质

同一土层，对荷载小的基础是很好的持力层，而对荷载大的基础则可能不适于作为持力层。承受横向荷载较小的受压基础，应尽量浅埋，但基础底面应埋置于植土或耕土层以下，埋深一般不小于0.5m。对承受较大上拔力的铁塔基础，为了充分发挥土体的抗拔能力，应尽量深埋，但不宜超过抗拔土体的临界深度。

2. 水文地质条件

遇有地下水的塔位，基础宜埋置于地下水位以上，如必须埋置在地下水位以下时，则应采取有效措施，以保证地基土在施工时不受扰动。跨河塔位的基础，基础底面必须埋置于局部冲刷深度以下。

基础的型式也决定基础的埋深。如直柱混凝土台阶式基础，当基础底面积确定后，由于需要满足刚性角的构造要求，就确定了基础的最小埋深。

3. 季节性冻土及多年冻土

设计基础时还必须考虑地基冻胀和融陷对基础埋深的影响。

（1）季节冻土地区基础埋深除应满足承载力等要求外，还应符合下列规定：

1）对不冻胀土，基础埋深按本节上述执行。

2）对弱冻胀、冻胀性地基土，基础埋置深度不宜小于设计冻深［见（式 9-318）］。

3）对强冻胀土、特强冻胀土，基础宜埋置在设

计冻深以下不小于 0.5m 处。

（2）多年冻土地区基础埋深除应满足承载力等要求外，还应符合下列规定：

1）对不衔接多年冻土地基，当基础底面位于融土夹层且满足地基土的稳定和变形要求时，可按季节冻土地基的相关规定确定基础的埋深。

2）对衔接多年冻土地基，当按保持冻结状态设计时，基础埋置深度可通过热工计算确定，但不得小于多年冻土稳定人为上限埋深以下 0.5m。在无稳定人为上限资料时，可根据冻土的设计融深 Z_d^m [见式（9-311）] 确定，并应满足表 9-1 的规定。

表 9-1　基础最小埋置深度 d_{min}

基础类型	基础最小埋深（m）
开挖回填类基础、掏挖基础	Z_d^m+1
桩基础	Z_d^m+2

三、影响土体抗拔力的附加因素

1. 水平荷载对抗拔力的影响

对于基础底板与主柱刚性连接的独立基础，当承受上拔力的同时伴有横向水平力作用时，土体抗拔力将会降低。水平荷载影响系数 γ_H 按水平力和上拔力的比值确定，见表 9-2。

表 9-2　水平荷载影响系数 γ_H

水平力 H_E 与上拔力 T_E 的比值	水平荷载影响系数 γ_H
0.15～0.40	1.0～0.9
0.40～0.70	0.9～0.8
0.70～1.00	0.8～0.75

2. 基础底板坡度的影响

基底上平面的展开角 θ 对土体抗拔力有一定影响，γ_θ 代表基底展开角影响系数。

3. 相邻基础同时承受上拔力的影响

相邻基础间距（根开）小，同时承受上拔力时的抗拔土体，当相邻基础承受上拔力之差小于 20%时，设计时必须考虑其对土体抗拔力的影响。

（1）尺寸相同的相邻基础，同时作用设计上拔力时，当采用了如图 9-3 计算简图，并按式（9-18）计算上拔稳定时，ΔV_t 应按下述条件确定。

1）正方形底板，当 $L<B+2h_t\tan\alpha$ 时：

$$\Delta V_t=\frac{(B+2h_t\tan\alpha-L)^2}{24\tan\alpha}(2B+L+4h_t\tan\alpha) \tag{9-1}$$

2）长方形底板，当 $L<b+2h_t\tan\alpha$ 或 $L<l+2h_t\tan\alpha$ 时：

$$\Delta V_t=\frac{(b+2h_t\tan\alpha-L)^2}{24\tan\alpha}(3l+L-b+4h_t\tan\alpha) \tag{9-2}$$

或

$$\Delta V_t=\frac{(l+2h_t\tan\alpha-L)^2}{24\tan\alpha}(3b+L-l+4h_t\tan\alpha) \tag{9-3}$$

式中　l——长度；

b——宽度。

3）圆形底板，当 $L<D+2h_t\tan\alpha$ 时：

$$\Delta V_t=\frac{(D+2h_t\tan\alpha)^2}{12}\left(\frac{D}{2\tan\alpha}+h_t\right)K_v \tag{9-4}$$

式中　K_v——土重法圆形底板相邻上拔基础影响系数，按表 9-3 查取。

表 9-3　土重法圆形底板相邻上拔基础影响系数 K_v

$L/(D+2h_t\tan\alpha)$	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2
K_v	0	0.02	0.05	0.10	0.33	0.35	0.55	0.85	1.00

注　如 $h_t>h_c$ 时，取 $h_t=h_c$。

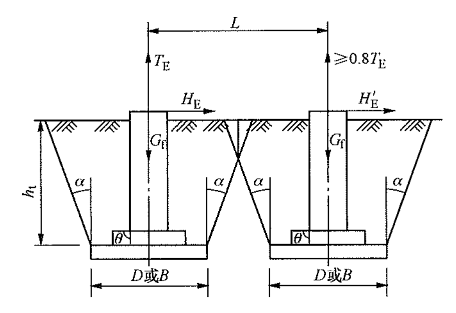


图 9-3　相邻上拔基础土重法计算简图

（2）尺寸相同的相邻基础，同时作用设计上拔力，当采用如图 9-4 计算简图，并按式（9-5）计算上拔稳定时，公式右侧应乘以相邻基础影响系数 γ_E，γ_E 按表 9-4 确定。

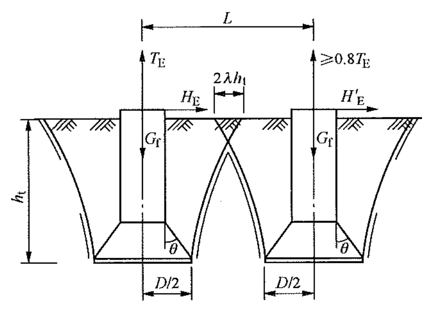


图 9-4　相邻上拔基础剪切法计算简图

表 9-4 相邻基础影响系数 γ_E

相邻上拔基础中心距离 L（m）	影响系数 γ_E
$L \geq D+2\lambda h_t$ 或 $L \geq D+2\lambda h_c$	1.0
$L=D$ 和 h_t 或 $h_c \leq 2.5D$	0.7
$L=D$ 和 $2.5D < h_t$ 或 $h_c \leq 3.0D$	0.65
$L=D$ 和 $3.0D < h_t$ 或 $h_c \leq 4.0D$	0.55
$D+2\lambda h_t$ 或 $D+2\lambda h_c > L > D$	按插入法确定

注 λ —与相邻抗拔土体剪切面有关的系数，当 $h_t \geq D$ 时，按表 9-5 查取；L —相邻上拔基础中心距离，m。

表 9-5 与相邻抗拔土体剪切面有关的系数 λ

土体的内摩擦角 φ	相邻抗拔土体剪切面有关的系数 λ
45°	0.65
40°	0.60
30°	0.55
20°	0.50
10°	0.45
0°	0.40

注 $\lambda=\dfrac{\cos\left[\left(\frac{\pi}{4}+\frac{\varphi}{2}\right)\left(\frac{D}{2h_t}\right)^2\right]-\sin\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)+\sin\left[\left(\frac{\pi}{4}+\frac{\varphi}{2}\right)\left(\frac{D}{2h_t}\right)^2\right]}$，当 $h_t > h_c$ 时，$h_t=h_c$。

四、剪切法

（一）适用的主要基础型式

1. 掏挖基础

该基础系将基础的钢筋骨架直接放入土胎内并将混凝土直接浇入其中的基础型式。钢筋骨架宜采用焊接以保持必要的刚度。为满足人工掏挖的施工操作和确保施工中人身安全的要求，对于人工掏挖基础的尺寸以基柱的直径不小于 0.8m。由于该型基础以天然不扰动土作为抗拔土体，因此在上拔稳定计算时的计算上拔深度应扣除表层非原状土层的厚度，当地面有植土或耕土层时，一般扣除 0.3m，水稻田扣除 0.5m。

2. 其他基础型式

对于开挖回填类基础，当砂类回填土经夯实能够达到天然状态的密实度时，将方形底板以其周长换算为等效圆形底板直径，也可按剪切法计算上拔稳定。

（二）剪切法计算上拔稳定

按下述条件确定，相邻基础影响按表 9-4 确定。

$$\gamma_f T_E \leq \gamma_H \gamma_{\theta 1} R_T \tag{9-5}$$

当 $h_t \leq h_c$ 时（见图 9-5）

$$R_T=\frac{A_1 c h_t^2 + A_2 \gamma_s h_t^3 + \gamma_s (A_3 h_t^3 - V_0)}{2.0}+G_f \tag{9-6}$$

当 $h_t > h_c$ 时（见图 9-6）

$$R_T=\frac{A_1 c h_c^2 + A_2 \gamma_s h_c^3 + \gamma_s (A_3 h_c^3 + \Delta V - V_0)}{2.0}+G_f \tag{9-7}$$

式中 γ_f ——基础附加分项系数，不应小于表 9-7 所列数值；

T_E ——基础上拔力设计值，kN；

γ_H ——水平荷载影响系数；

$\gamma_{\theta 1}$ ——基底展开角影响系数；当 $\theta > 45°$ 时取 $\gamma_{\theta 1}=1.2$；当 $\theta \leq 45°$ 时取 $\gamma_{\theta 1}=1.0$；

R_T ——基础单向抗拔承载力设计值，kN；

γ_s ——基础底面以上土的加权平均重度见表 9-12，kN/m³；

c ——按饱和不排水剪或相当于饱和不排水剪方法确定的黏聚力，kPa；

h_t ——基础抗拔计算埋深，m；

h_c ——基础上拔临界深度，按表 9-6 确定，m；

A_1、A_2、A_3 ——无因次计算系数，由抗拔土体滑动面形态、内摩擦角 φ 和基础深宽比 $\lambda(\lambda=h_t/D)$ 确定，由式（9-11）～式（9-14）、式（9-16）计算确定或查表 9-13 确定；

V_0 —— h_t 深度范围内基础体积，m³；

ΔV ——（h_t–h_c）范围内柱状滑动面体积，m³；

G_f ——基础自重力，kN，位于地下水位以下的基础重度应浮重度计算，混凝土基础的浮重度取 12kN/m³，钢筋混凝土基础的浮重度取 14kN/m³。

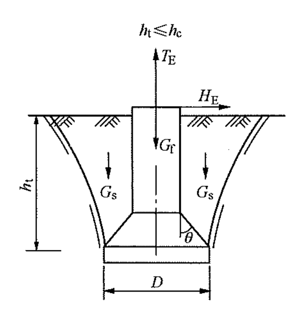


图 9-5 剪切法计算上拔稳定（一）

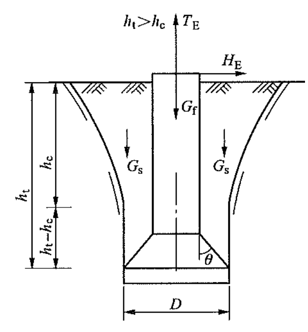


图 9-6　剪切法计算上拔稳定（二）

D—圆形底板直径，m

1. 原状土抗拔土体圆弧滑动面的确定

极限平衡状态下，原状土抗拔土体采用如图 9-7 所示圆弧滑动面，由式（9-8）确定：

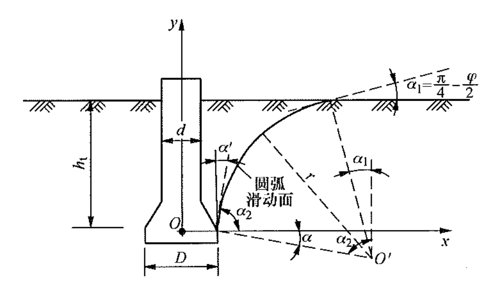


图 9-7　原状土掏挖基础抗拔计算圆弧滑动面模型

$$\left.\begin{aligned} r &= \frac{h_t}{\cos\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)-\sin\alpha} \\ \alpha &= \left(\frac{\pi}{4}+\frac{\varphi}{2}\right)\left(\frac{D}{2h_t}\right)^n \\ \alpha_1 &= \frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2} \\ \alpha_2 &= \frac{\pi}{2}-\alpha \end{aligned}\right\} \tag{9-8}$$

式中　r ——圆弧曲面半径，m。

φ ——抗拔土体的内摩擦角，rad。

α ——中间计算参数，表示半径 r 随基础深宽比 $\lambda(\lambda=h_t/D)$ 而变化的特征。

n ——抗拔土体滑动面形态参数，见表 9-13，随土体的物理力学特性变化而异，可根据试验确定。黏土宜取 $n=4$，砂类土宜取 $n=2\sim3$，戈壁滩碎石土宜取 $n=1.0\sim1.5$。

α_1 ——圆弧曲面在水平地面处与水平面夹角，(°)。

α_2 ——圆弧曲面在底板处与水平面夹角，(°)。

2. 掏挖抗拔基础极限承载力的确定

极限平衡状态下，原状土掏挖抗拔基础极限承载力剪切法计算模型如图 9-8 所示，基础极限抗拔承载力由基础混凝土自重、抗拔土体圆弧滑动面 $ABCD$ 所包含的抗拔土体重量以及滑动面上剪切阻力垂直投影分量 3 部分组成，如式（9-9）所示。

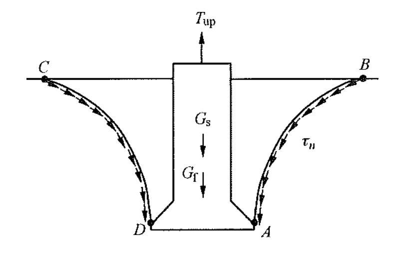


图 9-8　基础抗拔承载力剪切法统一计算模型

$$R_{up}=\begin{cases} T_v+G_s+G_f & h_t\leqslant h_c \\ T_v+G_s+\gamma_s\Delta V+G_f & h_t>h_c \end{cases} \tag{9-9}$$

式中　R_{up} ——基础极限抗拔承载力，kN；

T_v ——抗拔土体圆弧滑动面剪切阻力垂直投影分量，按式（9-10）确定，kN；

G_s ——圆弧滑动面内土体自重，按式（9-15）确定，kN。

（1）抗拔土体滑动面剪切阻力垂直投影分量 T_v，按式（9-10）计算确定：

$$T_v=A_1ch_t^2+A_2\gamma_sh_t^3 \tag{9-10}$$

$$A_1=2\pi K_1(1+\sin\varphi)e^{2\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)\tan\varphi}\left[\frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)-\sin\alpha}\right]^2 \tag{9-11}$$

$$A_2=\frac{2\pi\sin\varphi}{1+4\tan^2\varphi}\left\{K_2-K_1\cos\left(\frac{\pi}{4}+\frac{\varphi}{2}\right)e^{2\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)\tan\varphi}\times\left[2\tan\varphi\tan\left(\frac{\pi}{4}+\frac{\varphi}{2}\right)-1\right]\right\}\left[\frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)-\sin\alpha}\right]^3 \tag{9-12}$$

$$\begin{aligned} K_1 = &-\frac{1}{1+4\tan^2\varphi}\times\left\{\left[\frac{1}{2\lambda}\left(\cos\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)-\sin\alpha\right)+\cos\alpha\right]\right. \\ &\left\{\left[e^{-2\left(\frac{\pi}{2}-\alpha\right)\tan\varphi}(\sin\alpha+2\tan\varphi\cos\alpha)\right]-e^{-2\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)\tan\varphi}\right. \\ &\left.\left.\left[\cos\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)+2\tan\varphi\sin\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)\right]\right\}\right\}+\frac{1}{4\tan\varphi} \\ &\left[e^{-2\left(\frac{\pi}{2}-\alpha\right)\tan\varphi}-e^{-2\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)\tan\varphi}\right]+\frac{1}{4(1+\tan^2\varphi)} \\ &\left[e^{-2\left(\frac{\pi}{2}-\alpha\right)\tan\varphi}(\tan\varphi\cos2\alpha+\sin2\alpha)+e^{-2\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)\tan\varphi}\right. \\ &\left.(\tan\varphi\sin\varphi-\cos\varphi)\right] \end{aligned} \tag{9-13}$$

$$K_2=\left[\frac{1}{2\lambda}\left(\cos\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)-\sin\alpha\right)+\cos\alpha\right]\left[\left(\frac{3\pi}{8}-\frac{3\alpha}{2}+\frac{3\varphi}{4}\right)\sin\varphi-\frac{1}{2}\sin(2\alpha-\varphi)\tan\varphi+\frac{1}{2}\tan\varphi-\frac{1}{4}\cos(2\alpha-\varphi)\right]$$

$$+2\tan\varphi\left[\frac{1}{12}\sin(3\alpha-\varphi)+\frac{1}{2}\sin(\alpha-\varphi)+\frac{1}{4}\sin(\alpha+\varphi)+\frac{1}{12}\cos\left(\frac{3\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)-\frac{1}{2}\cos\left(\frac{\pi}{4}+\frac{\varphi}{2}\right)-\frac{1}{4}\cos\left(\frac{\pi}{4}-\frac{3\varphi}{2}\right)\right]$$

$$+\frac{1}{2}\cos(\alpha-\varphi)-\frac{1}{4}\cos(\alpha+\varphi)+\frac{1}{12}\cos(3\alpha-\varphi)-\frac{1}{2}\sin\left(\frac{\pi}{4}+\frac{\varphi}{2}\right)+\frac{1}{4}\sin\left(\frac{\pi}{4}-\frac{3\varphi}{2}\right)+\frac{1}{12}\sin\left(\frac{3\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right) \tag{9-14}$$

（2）圆弧滑动面内土体自重 G_s，按式（9-15）计算确定：

$$G_s=\gamma_s(A_3h_t^3-V_0) \tag{9-15}$$

$$A_3=\pi\left[\frac{1}{4\lambda^2}+\frac{1}{\lambda}\left(\frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)-\sin\alpha}\right)\cos\alpha+\left(\frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)-\sin\alpha}\right)^2\cos^2\alpha\right]-\frac{1}{4}\pi$$

$$\left(\frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)-\sin\alpha}\right)^2\left[\frac{1}{\lambda}+2\left(\frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)-\sin\alpha}\right)\cos\alpha\right]\left(\frac{\pi}{2}-2\alpha+\varphi-\sin2\alpha+\cos\varphi\right)-\frac{1}{3}\pi$$

$$\left(\frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)-\sin\alpha}\right)^3\left\{\sin\alpha(2+\cos^2\alpha)-\cos\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)\left[2+\sin^2\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)\right]\right\} \tag{9-16}$$

（3）当基础埋入软塑黏性原状土中且上拔深度（h_t）大于临界深度 h_c 时，上拔稳定尚应符合式（9-17）的要求。

$$\gamma_f T_E \leqslant 8D^2c+G_f \tag{9-17}$$

表 9-6　　剪切法临界深度 h_c

土的名称	土的状态	基础上拔临界深度 h_c
碎石、粗、中砂	密实～稍密	4.0D～3.0D
细、粉砂、粉土	密实～稍密	3.0D～2.5D
黏性土	坚硬～可塑	3.5D～2.5D
	可塑～软塑	2.5D～1.5D

注　计算上拔时的临界深度 h_c，即为土体整体破坏的计算深度。

表 9-7　　基础附加分项系数 γ_f

设计条件	上拔稳定		倾覆稳定	上拔、下压稳定
杆塔类型 \ 基础型式	重力式基础	其他类型基础	各类型基础	灌注桩基础
悬垂型杆塔	0.90	1.10	1.10	0.80
耐张直线（0°转角）及悬垂转角杆塔	0.95	1.30	1.30	1.00
耐张转角、终端、大跨越塔	1.10	1.60	1.60	1.25

（4）土的内摩擦角 φ 和黏聚力 c 应按下列方法确定：

基础上拔、下压及倾覆稳定和地基承载力计算时，应根据工程资料进行，当无资料时可参照表 9-8～表 9-10 分别确定。

表 9-8　　砂类土内摩擦角 φ

序号	土名	密实度（孔隙比 e 小者取大值）		
		密实	中密	稍密
1	砾砂、粗砂	45°～40°	40°～35°	35°～30°
2	中砂	40°～35°	35°～30°	30°～25°
3	细砂、粉砂	35°～30°	30°～25°	25°～20°

表 9-9　　黏性土及粉土黏聚力 c(kN/m²)和内摩擦角 φ

序号	土壤名称	塑性指数 I_p	抗剪强度指标	天然孔隙比 e					
				0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
1	粉土	3	c	18	10				
			φ	31°	30°				
2		5	c	28	20	13			
			φ	28°	27°	26°			
3		7	c	38	30	22			
			φ	25°	24°	23°			
4		9	c	47	38	31	24		
			φ	22°	21°	20°	19°		
5	粉质黏土	11	c	54	45	38	31	24	
			φ	20°	19°	18°	17°	15°	
6		13	c	59	51	43	36	30	
			φ	18°	17°	16°	15°	13°	

续表

序号	土壤名称	塑性指数 I_p	抗剪强度指标	天然孔隙比 e					
				0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
7	粉质黏土	15	c	62	55	48	41	34	27
			φ	16°	15°	14°	13°	11°	9°
8		17	c	66	58	51	43	37	31
			φ	14°	13°	12°	11°	10°	8°
9	黏土	19	c	68	60	52	45	38	32
			φ	13°	12°	11°	10°	8°	6°

表 9-10　　黏性土 c、φ 值

序号	按液性指数（I_L）分类	硬塑	可塑	软塑
1	c（kN/m²）	40～50	30～40	20～30
2	φ	15°～10°	10°～5°	5°～0°

五、土重法

（一）适用的主要基础型式

1. 装配式基础

装配式基础包括用多个部件拼装而成的预制钢筋混凝土基础、金属基础和角锥支架基础等，具有工厂制造、保证质量和加速工程施工进度等优点。适用于缺少砂、石和水的地区或严冬现场浇制混凝土有困难的线路，一般用于地下水位较深无腐蚀的塔位。此种基础需考虑单个运输构件的最大重量和最大尺寸，设计前需作必要的综合经济比较。

（1）预制钢筋混凝土基础：一般由基柱和底板两个单件在现场用螺栓或焊接组成整体，如图 9-2（a）、（b）所示。基柱由方形或环形截面组成。底板可为方形或圆形，截面宜选择梯形。该型基础适用于运输条件较方便的风化岩石或坚硬土的直线塔位。

（2）金属基础：塔腿主角钢延伸直接与金属底板连接，全部由型钢组成的基础型式，俗称花窗基础，如图 9-2（c）所示。底板由互相交叉的角钢组成空心网格状。实践表明，金属基础适用于无侵蚀性的直线塔位，特别是在运输条件极端困难的高山大岭的塔位使用更具有显著的经济效益。

（3）角锥支架基础：是由角钢组成的角锥形支架，通过槽钢或钢筋混凝土横梁用螺栓与钢筋混凝土板条连接成整体的钢和钢筋混凝土的混合结构，如图 9-2（d）所示。当荷载较小和允许单件重力较大，支架亦可由钢筋混凝土构件组成。对塔基位于运输特别困难的高山大岭，底板的板条亦可用型钢组成的网格体系代替。该型基础适用于山区荷载较大的直线塔和荷载较小的转角塔。

2. 直柱混凝土台阶式基础

这种基础是目前输电线路上使用广泛的基础型式。基础的方形钢筋混凝土基柱和混凝土台阶是在现场浇制而成的，如图 9-2（e）所示。

基础台阶的宽高比允许值一般不超过 1:1 的基础。它主要是以自身重量和扰动的回填土保持上拔稳定。主要优点是施工难度较小，施工工艺非常成熟，但混凝土用量较大，工程造价高，一般仅用在特殊地质条件的塔基，例如地下水位较高的塔位或沙漠地区等。

3. 直柱或斜柱钢筋混凝土板式基础

直柱或斜柱钢筋混凝土板式基础适用的地质范围较广，如图 9-2（f）、（g）所示。该基础底板的宽高比一般不大于 2.5，主柱和底板都配筋。与直柱混凝土台阶式基础相比，混凝土的用量较小，耗钢量较大，综合造价较低，其中斜柱的基础型式较直柱的更有优势。板式基础需开挖的土石方量较大，对自然环境有一定的影响。

4. 拉线基础

拉线基础可由工厂预制的钢筋混凝土构件、石材构件、现场浇制的混凝土和钢筋混凝土构成。

（1）拉线盘：拉线盘宜采用钢筋混凝土构件，亦可就地取材选用石材构件。拉线盘上平面可垂直于拉线布置如图 9-2（h）所示，或平行于地面布置如图 9-2（i）所示，其长短边的长度比以 2～3 较适宜。拉线盘在工厂预制，具有质量好、施工进度快以及经济效益高等优点，因而被广泛地应用。

（2）现浇混凝土拉线基础：如图 9-2（j）所示，此类基础由于具有耗材多、施工麻烦和造价高等缺点，因此只在单件体积较大或运输困难的塔位使用。

（二）土重法计算上拔稳定

1. 自立式铁塔基础上拔稳定，按式（9-18）计算

$$\gamma_f T_E \leqslant \gamma_H \gamma_s \gamma_{\theta 2}(V_t - \Delta V_t - V_0) + G_f \tag{9-18}$$

式中　$\gamma_{\theta 2}$ ——基底展开角影响系数，当坡角 $\theta \geqslant 45°$ 时，取 $\gamma_{\theta 2}=1.0$；当坡角 $\theta < 45°$ 时，取 $\gamma_{\theta 2}=0.8$；

V_t —— h_t 深度内土和基础的体积，m³；

ΔV_t ——相邻基础影响的微体积，m³，见式（9-2）～式（9-4）；

V_0 —— h_t 深度内的基础体积，m³。

（1）当 $h_t \leqslant h_c$ 时（图 9-9）

方形底板：

$$V_t = h_t\left(B^2 + 2Bh_t \tan\alpha + \frac{4}{3}h_t^2 \tan^2\alpha\right) \tag{9-19}$$

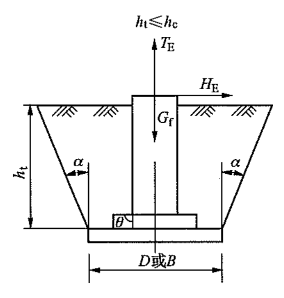


图 9-9 土重法计算上拔稳定（一）

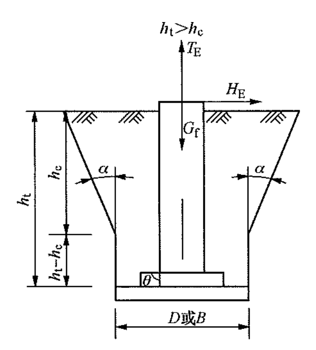


图 9-10 土重法计算上拔稳定（二）

圆形底板：

$$V_t=\frac{\pi h_t}{4}\left(D^2+2Dh_t\tan\alpha+\frac{4}{3}h_t^2\tan^2\alpha\right) \tag{9-20}$$

（2）当 $h_t > h_c$ 时（图 9-10）

方形底板：

$$V_t=h_c\left(B^2+2Bh_c\tan\alpha+\frac{4}{3}h_c^2\tan^2\alpha\right)+B^2(h_t-h_c) \tag{9-21}$$

圆形底板：

$$V_t=\frac{\pi}{4}\left[h_c\left(D^2+2Dh_c\tan\alpha+\frac{4}{3}h_c^2\tan^2\alpha\right)+D^2(h_t-h_c)\right] \tag{9-22}$$

式中 h_c ——土重法临界深度，按表 9-11 确定；

α ——上拔角，按表 9-12 取用。

表 9-11 土重法临界深度 h_c

土的名称	土的天然状态	基础上拔临界深度 h_c	
		圆形底	方形底
砂类土、粉土	密实～稍密	2.5*D*	3.0*B*
黏性土	坚硬～硬塑	2.0*D*	2.5*B*
	可塑	1.5*D*	2.0*B*
	软塑	1.2*D*	1.5*B*

注 1. 长方形底板当长边 l 与短边 b 之比不大于 3 时，取 $D=0.6(b+l)$。

2. 土的状态按天然状态确定。

表 9-12 土 重 度 和 上 拔 角

参 数	黏土及粉质黏土			粉土			砂土			
	坚硬、硬塑	可塑	软塑	密实	中密	稍密	砾砂	粗、中砂	细砂	粉砂
重度 γ_s（kN/m³）	17	16	15	17	16	15	19	17	16	15
上拔角 α（°）	25	20	10	25	20	10～15	30	28	26	22

注 1. 位于地下水位以下的土体重度应按浮重度计算，上拔角按本表取值。土的浮重度可根据土的类别和密实度取 8～11kN/m³（一般砂土取小值，黏性土取大值），但计算悬垂型杆塔基础稳定时，粉质黏土和黏土的浮重度可取天然重度。

2. 对于稍密粉土的上拔角，当有工程经验时，可适当提高。

2. 拉线盘的上拔稳定，按式（9-23）计算

$$\gamma_f T\sin\omega \leqslant V_t\gamma_s+G_f \tag{9-23}$$

（1）当 $h_t \leqslant h_c$ 时，抗拔土体的体积 V_t 按下式确定（见图 9-11）。

$$V_t=h_t\left[bl\sin\omega_1+(b\sin\omega_1+l)h_t\tan\alpha+\frac{4}{3}h_t^2\tan^2\alpha\right] \tag{9-24}$$

（2）当 $h_t > h_c$ 时，抗拔土体的体积 V_t 按下式确定（见图 9-12）。

$$V_t=h_c\left[bl\sin\omega_1+(b\sin\omega_1+l)h_c\tan\alpha+\frac{4}{3}h_c^2\tan^2\alpha\right]+bl(h_t-h_c)\sin\omega_1 \tag{9-25}$$

式中 T ——拉线拉力设计值，N；

ω——拉线拉力 T 与水平地面的夹角，（°），ω 应大于 45°；

ω_1 ——拉线盘上平面与垂面的夹角，（°）。

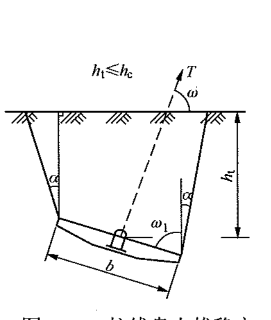


图 9-11 拉线盘上拔稳定计算简图（一）

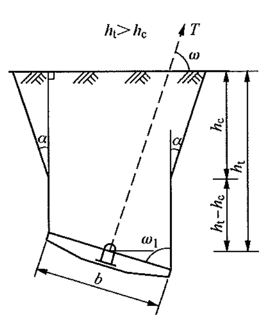


图 9-12 拉线盘上拔稳定计算简图（二）

表 9-13　　原状土基础剪切法抗拔计算参数表

λ	φ (°)	n=1			n=1.5			n=2			n=3			n=4		
		A_1	A_2	A_3	A_1	A_2	A_3	A_1	A_2	A_3	A_1	A_2	A_3	A_1	A_2	A_3
1.0	5	5.327	0.197	2.172	4.917	0.184	1.875	4.648	0.175	1.692	4.343	0.165	1.495	4.198	0.160	1.405
1.0	10	5.684	0.416	2.293	5.164	0.381	1.960	4.829	0.359	1.758	4.454	0.334	1.542	4.277	0.322	1.445
1.0	15	6.002	0.654	2.421	5.361	0.588	2.049	4.954	0.547	1.826	4.506	0.501	1.591	4.297	0.480	1.485
1.0	20	6.272	0.909	2.559	5.498	0.801	2.143	5.016	0.735	1.896	4.495	0.663	1.640	4.256	0.630	1.525
1.0	25	6.481	1.177	2.706	5.566	1.014	2.240	5.009	0.916	1.969	4.417	0.813	1.690	4.149	0.766	1.566
1.0	30	6.618	1.453	2.865	5.557	1.221	2.343	4.926	1.086	2.044	4.270	0.945	1.740	3.978	0.883	1.607
1.0	35	6.669	1.729	3.035	5.462	1.415	2.451	4.763	1.236	2.122	4.053	1.055	1.792	3.744	0.976	1.648
1.0	40	6.620	1.999	3.219	5.273	1.589	2.563	4.517	1.361	2.202	3.769	1.137	1.843	3.449	1.041	1.689
1.0	45	6.455	2.252	3.417	4.985	1.731	2.681	4.188	1.453	2.284	3.421	1.185	1.895	3.101	1.073	1.730
1.5	5	3.781	0.135	1.146	3.435	0.124	0.956	3.247	0.118	0.860	3.081	0.112	0.779	3.027	0.111	0.754
1.5	10	3.993	0.281	1.211	3.574	0.254	1.002	3.349	0.239	0.896	3.154	0.226	0.808	3.090	0.222	0.781
1.5	15	4.168	0.435	1.281	3.671	0.386	1.049	3.409	0.360	0.933	3.184	0.338	0.838	3.111	0.331	0.808
1.5	20	4.297	0.595	1.354	3.720	0.518	1.097	3.422	0.478	0.971	3.168	0.444	0.867	3.087	0.434	0.835
1.5	25	4.374	0.756	1.430	3.718	0.644	1.147	3.385	0.588	1.010	3.105	0.541	0.897	3.017	0.526	0.862
1.5	30	4.391	0.913	1.511	3.659	0.761	1.199	3.295	0.686	1.049	2.994	0.625	0.928	2.900	0.605	0.890
1.5	35	4.340	1.061	1.595	3.539	0.864	1.252	3.150	0.769	1.089	2.835	0.692	0.958	2.737	0.668	0.917
1.5	40	4.214	1.195	1.684	3.358	0.948	1.306	2.952	0.832	1.129	2.629	0.739	0.988	2.529	0.710	0.945
1.5	45	4.006	1.306	1.777	3.113	1.007	1.362	2.702	0.871	1.170	2.380	0.763	1.018	2.282	0.731	0.971
2.0	5	3.036	0.105	0.764	2.746	0.096	0.632	2.608	0.091	0.573	2.506	0.088	0.531	2.481	0.087	0.521
2.0	10	3.196	0.217	0.811	2.853	0.195	0.664	2.691	0.185	0.600	2.574	0.177	0.554	2.545	0.176	0.544
2.0	15	3.323	0.335	0.860	2.925	0.296	0.698	2.741	0.278	0.627	2.608	0.265	0.578	2.575	0.262	0.566
2.0	20	3.411	0.454	0.911	2.959	0.395	0.733	2.752	0.368	0.656	2.605	0.349	0.602	2.569	0.345	0.589
2.0	25	3.455	0.573	0.964	2.951	0.490	0.769	2.724	0.452	0.684	2.563	0.426	0.626	2.524	0.419	0.613
2.0	30	3.448	0.686	1.019	2.896	0.575	0.805	2.652	0.526	0.714	2.482	0.492	0.651	2.440	0.484	0.636
2.0	35	3.386	0.791	1.077	2.794	0.649	0.842	2.537	0.588	0.743	2.360	0.546	0.675	2.317	0.536	0.659
2.0	40	3.263	0.881	1.137	2.642	0.707	0.880	2.379	0.634	0.773	2.199	0.584	0.700	2.156	0.572	0.683
2.0	45	3.077	0.952	1.199	2.442	0.746	0.918	2.178	0.661	0.802	2.001	0.604	0.724	1.959	0.590	0.705
2.5	5	2.596	0.087	0.576	2.348	0.079	0.476	2.241	0.076	0.435	2.174	0.074	0.411	2.160	0.073	0.406
2.5	10	2.731	0.180	0.613	2.442	0.162	0.502	2.319	0.154	0.458	2.241	0.149	0.431	2.226	0.148	0.426
2.5	15	2.837	0.277	0.652	2.506	0.245	0.530	2.367	0.232	0.482	2.280	0.224	0.452	2.262	0.222	0.446
2.5	20	2.908	0.375	0.692	2.537	0.327	0.558	2.383	0.307	0.505	2.286	0.295	0.473	2.268	0.292	0.467
2.5	25	2.941	0.471	0.734	2.531	0.404	0.587	2.363	0.377	0.530	2.260	0.360	0.495	2.239	0.357	0.488
2.5	30	2.929	0.562	0.778	2.486	0.475	0.617	2.307	0.439	0.554	2.197	0.418	0.517	2.176	0.414	0.509
2.5	35	2.870	0.645	0.823	2.399	0.535	0.647	2.213	0.491	0.579	2.099	0.464	0.538	2.077	0.459	0.531
2.5	40	2.758	0.715	0.869	2.270	0.581	0.677	2.080	0.530	0.604	1.965	0.498	0.560	1.943	0.492	0.552
2.5	45	2.592	0.768	0.917	2.099	0.612	0.708	1.911	0.552	0.629	1.798	0.517	0.582	1.776	0.510	0.573

续表

λ	φ (°)	n=1			n=1.5			n=2			n=3			n=4		
		A_1	A_2	A_3	A_1	A_2	A_3	A_1	A_2	A_3	A_1	A_2	A_3	A_1	A_2	A_3
3.0	5	2.306	0.076	0.466	2.089	0.069	0.387	2.004	0.066	0.357	1.955	0.064	0.341	1.947	0.064	0.338
3.0	10	2.427	0.156	0.498	2.176	0.140	0.410	2.079	0.134	0.378	2.023	0.131	0.360	2.014	0.130	0.357
3.0	15	2.521	0.239	0.531	2.237	0.212	0.434	2.127	0.202	0.399	2.066	0.196	0.379	2.056	0.195	0.376
3.0	20	2.584	0.324	0.565	2.268	0.283	0.459	2.148	0.268	0.420	2.080	0.259	0.399	2.069	0.258	0.395
3.0	25	2.613	0.406	0.601	2.267	0.351	0.484	2.136	0.330	0.442	2.064	0.318	0.419	2.052	0.316	0.415
3.0	30	2.601	0.484	0.637	2.230	0.411	0.510	2.091	0.384	0.464	2.015	0.370	0.439	2.002	0.367	0.435
3.0	35	2.546	0.554	0.675	2.155	0.463	0.536	2.012	0.430	0.486	1.933	0.412	0.459	1.920	0.409	0.455
3.0	40	2.445	0.612	0.714	2.042	0.504	0.562	1.897	0.465	0.508	1.817	0.443	0.479	1.804	0.440	0.475
3.0	45	2.296	0.656	0.754	1.891	0.530	0.589	1.748	0.486	0.531	1.670	0.461	0.499	1.657	0.458	0.494
3.5	5	2.100	0.067	0.396	1.908	0.061	0.330	1.837	0.059	0.308	1.801	0.058	0.296	1.796	0.058	0.295
3.5	10	2.212	0.139	0.424	1.991	0.125	0.351	1.911	0.120	0.326	1.870	0.117	0.314	1.864	0.117	0.312
3.5	15	2.299	0.213	0.453	2.051	0.190	0.373	1.961	0.181	0.346	1.915	0.177	0.332	1.909	0.176	0.330
3.5	20	2.358	0.288	0.483	2.083	0.253	0.395	1.985	0.241	0.366	1.935	0.234	0.351	1.928	0.233	0.349
3.5	25	2.385	0.361	0.515	2.085	0.313	0.418	1.980	0.297	0.386	1.926	0.288	0.370	1.918	0.287	0.367
3.5	30	2.375	0.430	0.547	2.055	0.368	0.442	1.943	0.346	0.406	1.887	0.336	0.389	1.879	0.334	0.386
3.5	35	2.325	0.491	0.580	1.990	0.415	0.465	1.875	0.388	0.427	1.817	0.375	0.408	1.808	0.373	0.405
3.5	40	2.232	0.543	0.615	1.889	0.451	0.489	1.773	0.420	0.448	1.714	0.405	0.427	1.706	0.403	0.424
3.5	45	2.096	0.581	0.649	1.753	0.475	0.513	1.638	0.440	0.468	1.581	0.423	0.446	1.573	0.420	0.443
4.0	5	1.947	0.061	0.347	1.774	0.056	0.292	1.714	0.054	0.274	1.686	0.053	0.265	1.682	0.053	0.264
4.0	10	2.052	0.126	0.373	1.855	0.114	0.311	1.787	0.110	0.291	1.755	0.108	0.282	1.751	0.107	0.281
4.0	15	2.135	0.194	0.399	1.914	0.173	0.332	1.839	0.166	0.310	1.803	0.162	0.300	1.799	0.162	0.298
4.0	20	2.191	0.262	0.427	1.947	0.231	0.352	1.865	0.221	0.328	1.827	0.216	0.317	1.822	0.215	0.316
4.0	25	2.217	0.328	0.455	1.953	0.286	0.374	1.865	0.272	0.347	1.824	0.266	0.335	1.819	0.265	0.334
4.0	30	2.209	0.390	0.485	1.928	0.336	0.395	1.835	0.319	0.367	1.792	0.310	0.354	1.787	0.309	0.352
4.0	35	2.164	0.446	0.515	1.871	0.380	0.417	1.775	0.358	0.386	1.731	0.348	0.372	1.725	0.347	0.370
4.0	40	2.079	0.493	0.546	1.779	0.414	0.439	1.683	0.388	0.406	1.638	0.376	0.391	1.633	0.375	0.389
4.0	45	1.952	0.527	0.577	1.654	0.436	0.462	1.559	0.407	0.425	1.516	0.394	0.409	1.510	0.392	0.407

注　n—抗拔土体滑动面形态参数。随土体的物理力学特性变化而异，可根据试验确定。黏土宜取 $n=4$，砂类土宜取 $n=2\sim3$，戈壁滩碎石土宜取 $n=1.0\sim1.5$。

第二节　地基下压计算

地基压力是指基础传递给地基持力层顶面处的压力，即基础底板处的地基所受的压力，地基计算包括地基强度计算和长期荷载作用下地基变形计算。

一、地基压力

地基压力的分布取决于地基与底板的相对刚度、荷载大小、基础埋深和土的性质等多种因素。输电线路杆塔基础的底板，无论刚性底板或柔性底板，其刚度均大大超过地基土（除岩石外）的刚度，

可看作是绝对刚体。理论和实验都证明，轴心受压时刚性基础下的地基压力呈非线性分布，而且压力图形随荷载大小、土的性质、基础埋深等因素的变化而变化。但一般情况下，均从工程实用观点出发，采取简化计算方法，假定地基压力分布按线性变化。根据承受荷载的性质，地基压力分别按下列各式确定。

（一）轴心荷载

基础底面的压力 P（kN/m²）按图 9-13 均匀分布计算

$$P=\frac{F+\gamma_G G}{A} \tag{9-26}$$

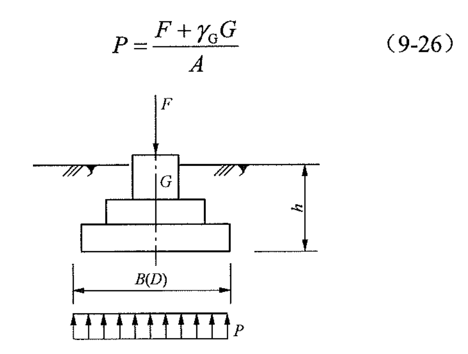


图 9-13 轴心荷载地基压力计算简图

式中 F——上部结构传至基础底面的竖向压力设计值，kN；

G——基础自重和基础上的土重，kN；

γ_G——永久荷载分项系数，对基础有利时，宜取 $\gamma_G=1.0$；不利时，应取 $\gamma_G=1.2$；

A——基础底面面积，m²。

（二）单向偏心荷载

基础底面的压力 P（kN/m²）按图 9-14（a）～（d）分布计算：

$$\left.\begin{aligned}P_{max}&=\frac{F+\gamma_G G}{A}+\frac{M}{W}\\P_{min}&=\frac{F+\gamma_G G}{A}-\frac{M}{W}\end{aligned}\right\} \tag{9-27}$$

式中 M——作用于基础底面的力矩，kN·m，对不考虑侧向土压力的基础型式，$M=F_H(h+h_0)$，F_H 为作用于基础顶面的水平力设计值，h_0 为主柱露出地面高度。对考虑侧向土压力的基础型式，M 可按本节“（四）原状土基础基柱考虑土抗力时侧向弯矩的近似计算”部分计算。

W——基础底面对垂直力矩方向的形心轴的抵抗矩，m³。

当按式（9-27）求得的最小压力 $P_{min}<0$ 时，基础底面一端压力为负值，即产生拉力如图 9-14（c）所示。实际上由于基础与地基间不能承受拉力，所以基础底面将部分和地基脱离，基础底面的压力分布假定如图 9-14（d）所示的三角形。此时基础底面三角形压力的合力与外荷载 $F+\gamma_G G$ 的大小相等、方向相反而相互平衡，由此可求出边缘最大压力 P_{max}。

$$P_{max}=\frac{F+\gamma_G G}{A}m_a \tag{9-28}$$

式中 m_a——与偏心矩 e_0 和底板边长 B 或直径 D 有关的系数。

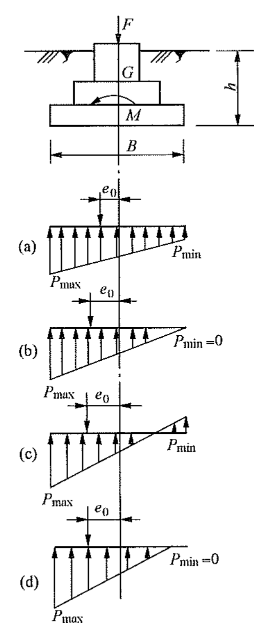


图 9-14 单向偏心荷载地基压力计算简图

对矩形底板，系数 m_a 和偏心矩 e_0 分别为

$$m_a=\frac{2}{3\times\left(\frac{1}{2}-\frac{e_0}{B}\right)}$$

$$e_0=\frac{M}{F+\gamma_G G}$$

式中 B——平行于力矩 M 方向的长边或短边长，对圆形底板 m_a 可按表 9-14 取值。

其他符号含义同式（9-26）。

表 9-14 系数 m_a

e_0/D	0.125	0.143	0.205	0.295	0.390
m_a	2.0	2.1	2.8	4.7	12.4

（三）双向偏心荷载

基础底面的压力 P（kN/m²）按图 9-15 分布计算：

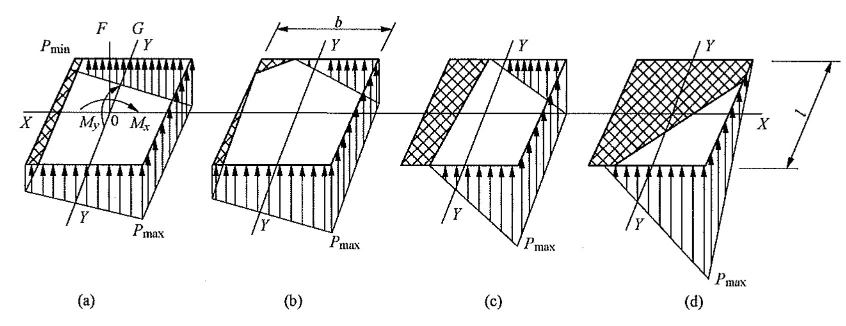


图 9-15 双向偏心荷载地基压力计算简图

$$\left.\begin{aligned} P_{max} &= \frac{F+\gamma_G G}{A}+\frac{M_x}{W_y}+\frac{M_y}{W_x} \\ P_{min} &= \frac{F+\gamma_G G}{A}-\frac{M_x}{W_y}-\frac{M_y}{W_x} \end{aligned}\right\} \quad (9\text{-}29)$$

式中 M_x、M_y——分别为作用于基础底面平行 X 轴和 Y 轴方向的力矩设计值，kN·m；

W_x、W_y——分别为基础底面对 X 轴和 Y 轴的抵抗矩，m^3。

当按式（9-29）求得的最小压力 $P_{min}<0$ 时，基础底面压力可出现图 9-15（b）、（c）、（d）等三种中任一种分布情况（阴影部分为基础底板与地基脱开部分）。此时，由基础底面压力的合力与外荷载 $F+\gamma_G G$ 大小相等、方向相反的平衡条件，可求出边缘的最大压应力 P_{max}，即

$$\left.\begin{aligned} P_{max} &= \frac{F+\gamma_G G}{C_x C_y}\times m_b \\ C_x &= \frac{b}{2}-\frac{M_x}{F+\gamma_G G} \\ C_y &= \frac{l}{2}-\frac{M_y}{F+\gamma_G G} \end{aligned}\right\} \quad (9\text{-}30)$$

式中 b、l——分别为基础底面沿 X 方向和 Y 方向的宽度，m；

m_b——与基础底面压力图形有关的系数。

根据计算，图 9-15（b）、（c）、（d）所示的地基压力图形，m_b=0.333～0.375，一般可近似取 $m_b=0.35$。当按式（9-30）计算不大于按式（9-29）计算值时，则取 $m_b=0.375$。

（四）原状土基础基柱考虑土抗力时侧向弯矩的近似计算

弹性基柱的计算参见本章“第五节 桩基础”中的“二、钻孔灌注桩基础”部分。

刚性基柱应符合下述要求

$$l \leqslant 2.5/\alpha \quad (9\text{-}31)$$

$$\alpha=\left(\frac{md_0}{EI}\right)^{\frac{1}{5}} \quad (9\text{-}32)$$

式中 l——基柱的入土深度，m；

α——基柱的变形系数，m^{-1}；

m——地基土水平抗力系数的比例系数，kN/m^4；

d_0——基柱的直径，m；

EI——基柱的抗弯刚度，悬垂型杆塔时取 $EI=0.8E_cI$，非悬垂型杆塔时取 $EI=0.667E_cI$，kPa；

E_c——混凝土的弹性模量，kPa；

I——截面的惯性矩，m^4。

当竖向力和侧向力共同作用时，原状土刚性基柱宜考虑基柱摩阻力的影响，基柱摩阻力可按下式估算：

$$R_f=k_R q_s \pi d_0 l \quad (9\text{-}33)$$

式中 R_f——基柱的总摩阻力，kN；

k_R——基柱摩阻力发挥系数，宜通过试验确定；

q_s——基柱与土体接触面之间的加权平均摩阻力，kN/m^2。

原状土基础刚性基柱侧向弯矩，如图 9-16 所示，可按下列公式确定：

基柱任一截面弯矩 M_x

$$M_x=M_0+Hx-d\omega\frac{mx^3}{12}(2x_A-x) \quad (9\text{-}34)$$

作用于基底截面上的弯矩 M_h

$$M_h=M_0+Hh-d\omega\frac{mh^3}{12}(2x_A-h) \quad (9\text{-}35)$$

基础的旋转角

$$\omega=\frac{12(3M_0+2Hh)}{mdh^4+18c_0WD} \quad (9\text{-}36)$$

基础旋转角中心 A 的位置 x_A 为

$$x_A=\frac{mdh^3(4M_0+3Hh)+6C_0HDW}{2mdh^2(3M_0+2Hh)} \quad (9\text{-}37)$$

$$c_0=m_0h \quad (9\text{-}38)$$

式中 H ——作用于基础顶面上的横向力，kN；

M_0 ——作用于基础顶面上的弯矩，kN·m；

h ——基础的埋深，m；

c_0 ——基底地基土的竖向抗力系数，kN/m³；

m_0 ——基底地基土竖向抗力系数的比例系数，近似计算时可取 $m_0 = m$，kN/m⁴；

d ——基柱的计算直径，m，当 $d_0 \leqslant 1.0$m 时，取 $d = 0.9(1.5d_0 + 0.5)$；当 $d_0 > 1.0$m 时，取 $d = 0.9(d_0 + 1.0)$；

D ——基础扩底直径，m；

W ——基础扩底截面抵抗矩，m³。

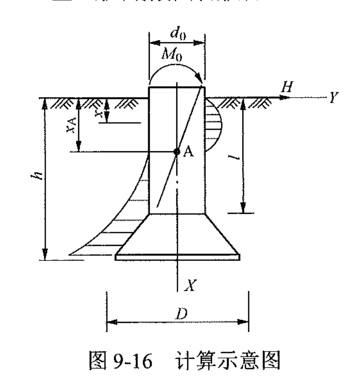


图 9-16 计算示意图

二、地基强度

除软弱地质外，杆塔基础的几何尺寸，通常均按上拔稳定要求确定，此时地基的强度计算是在已知基础几何尺寸条件下的验算。地基强度计算包括地基持力层的强度验算以及在地基压缩层深度内的软弱下卧层的强度验算。

(一) 地基持力层的强度验算

基础底面的压力，应符合下列要求：

(1) 当轴心荷载作用时，应符合下式要求

$$\gamma_{rf} P \leqslant f_a \tag{9-39}$$

式中 γ_{rf} ——地基承载力调整系数，取 0.75；

P ——基础底面处的平均压力设计值，kPa，按本节地基压力部分确定；

f_a ——修正后的地基承载力特征值，按本节地基承载力部分确定。

(2) 当偏心荷载作用时，应满足式 (9-39) 和式 (9-40) 的要求

$$\gamma_{rf} P_{max} \leqslant 1.2 f_a \tag{9-40}$$

式中 P_{max} ——基础底面边缘最大压力设计值，kPa，按本节地基压力部分确定。

(二) 地基软弱下卧层的强度验算

工程实践中常遇到持力层土质较好，下卧层土质较弱的情况。此时，首先按持力层强度确定基础底面积，然后校核下卧层顶面的压力。

当地基受力层范围内有软弱下卧层时，应按下式计算

$$P_z + P_{cz} \leqslant \frac{f_a}{\gamma_{rf}} \tag{9-41}$$

矩形底面

$$P_z = \frac{lb(P - p_c)}{(b + 2Z\tan\theta)(l + 2Z\tan\theta)} \tag{9-42}$$

方形底面

$$P_z = \frac{B^2(P - p_c)}{(B + 2Z\tan\theta)^2} \tag{9-43}$$

圆形底面

$$P_z = \frac{D^2(P - P_c)}{(D + 2Z\tan\theta)^2} \tag{9-44}$$

式中 P_z ——软弱下卧层顶面处的附加压力设计值，kPa；

P_{cz} ——软弱下卧层顶面处土的自重压力设计值，kPa；

P_c ——基础底面处土的自重压力设计值，kPa；

Z ——基础底面至软弱下卧层顶面的距离，m；

θ ——地基压力扩散线与垂直线的夹角（地基压力扩散角），可按表 9-15 采用。

表 9-15 地基压力扩散角 θ

E_{s1}/E_{s2}	Z/b	
	0.25	0.50
3	6°	23°
5	10°	25°
10	20°	30°

注 1. E_{s1} 为上层土压缩模量；E_{s2} 为下层土压缩模量。
2. 当 Z/b (Z/B、Z/D) < 0.25 时取 $\theta = 0$，必要时宜由试验确定，Z/b (Z/B、Z/D) > 0.5 时 θ 值不变。
3. Z/b (Z/B、Z/D) 在 0.25 与 0.50 之间可插值使用。

两相邻受压基础的中心距离 $L < b + 2Z\tan\theta$ 或 $L < l + 2Z\tan\theta$ 时，软弱下卧层顶面处的附加应力 P_z 尚应加上相邻基础对该层的附加压应力。

三、地基变形

经验证明，对一般杆塔地基只要在强度上符合容许承载力要求，则可不必进行地基变形计算，只是对某些有特殊要求的重要杆塔地基需进行地基变形计算。基于铁塔单独基础横向荷载远比竖向荷载小，因而杆塔基础地基的变形主要是计算竖向的最终沉降量，并使其符合容许沉降量和容许沉降差的

要求。

（一）变形用计算荷载

基础地基在附加压力作用下，砂类土在较短时期就可完成其沉降过程，而黏性土地基总要延续相当长的时间才能完结其沉降过程。为此，在计算地基最终沉降量时，将根据地质条件采取相应的荷载。

（1）砂类土地基设计荷载，采用输电线路杆塔基础承受的短期运行荷载，包括最大风荷载、最大覆冰、断线、安装引起的荷载等。

（2）一般黏性土地基设计荷载，采用杆塔基础承受的长期荷载，包括导线、避雷线、杆塔和基础自重力以及在 5m/s 风速、年平均气温条件下导、地线张力引起的荷载等。

（二）地基变形允许值

对某些有特殊变形要求的杆塔基础，包括处于软弱地基的输电线路的转角和耐张塔及大跨越塔、微波塔、电视塔的基础等，基础的最大倾斜率δ（不含基础预偏值）应满足表 9-16 的要求。

表 9-16 地基变形允许值

杆塔总高度 H_g（m）	$H_g \leqslant 50$	$50 < H_g \leqslant 100$	$100 < H_g \leqslant 150$	$150 < H_g \leqslant 200$	$200 < H_g \leqslant 250$	$250 < H_g \leqslant 300$
δ	0.006	0.005	0.004	0.003	0.002	0.0015

注 倾斜率指基础倾斜方向两端点的沉降差与其距离的比值。

（三）最终变形（沉降）量的计算

计算地基变形时，地基内的应力分布，可采用各向同性均质的线性变形体理论。其最终变形（沉降）量可按式（9-45）计算：

$$s = \psi_s s' = \psi_s \sum_{i=1}^{n} \frac{P_0}{E_{si}} (z_i \overline{\alpha_i} - z_{i-1} \overline{\alpha_{i-1}}) \tag{9-45}$$

式中 s ——地基最终变形量，mm；

s' ——按分层总和法计算出的地基变形量，mm；

ψ_s ——沉降计算经验系数，根据地区沉降观测资料及经验确定，也可采用表 9-17 数值；

n ——地基沉降计算深度范围内所划分的土层数（图 9-17）；

P_0 ——基础底面处的附加压力标准值，kPa；

E_{si} ——基础底面下第 i 层土的压缩模量，kPa，应取土的自重压力至土的自重压力与附加压力之和的压力段计算；

z_i、z_{i-1} ——基础底面至第 i 层土、第 $i-1$ 层土底面的距离，m；

$\overline{\alpha_i}$、$\overline{\alpha_{i-1}}$ ——基础底面计算点至第 i 层土、第 $i-1$ 层土底面范围内平均附加应力系数，可按表 9-36～表 9-40 采用。

表 9-17 沉降计算经验系数 ψ_s

基底附加压力（kPa） \ $\overline{E_s}$（MPa）	2.5	4.0	7.0	15.0	20.0
$P_0 \geqslant f$	1.4	1.3	1.0	0.4	0.2
$P_0 \leqslant 0.75f$	1.1	1.0	0.7	0.4	0.2

$\overline{E_s}$ 为沉降计算深度范围内压缩模量的当量值，应按下式计算

$$\overline{E_s} = \frac{\sum A_i}{\sum \frac{A_i}{E_{si}}} \tag{9-46}$$

式中 A_i ——第 i 层土附加应力系数沿土层厚度的积分值。

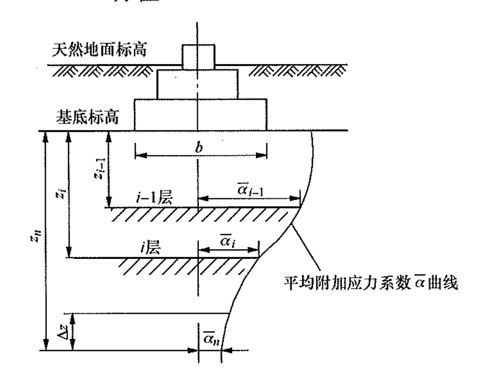


图 9-17 基础沉降计算分层示意图

地基变形计算深度 z_n（图 9-17），应符合式（9-47）的要求。当计算深度下部仍有较软土层时，应继续计算。

$$\Delta s'_n \leqslant 0.025 \sum_{i=1}^{n} \Delta s'_i \tag{9-47}$$

式中 $\Delta s'_i$ ——在计算深度范围内，第 i 层土的计算变形值，m；

$\Delta s'_n$ ——在由计算深度向上取厚度为 Δz 的土层计算变形值，m。

其中 Δz 按表 9-18 确定。

表 9-18 Δz 值

b（m）	$b \leqslant 2$	$2 < b \leqslant 4$	$4 < b \leqslant 8$	$b > 8$
Δz（m）	0.3	0.6	0.8	1.0

当无相邻荷载影响，基础宽度在（1～30）m 范围内时，基础中点的地基沉降计算深度也可按下列简化公式计算

$$z_n = b(2.5 - 0.4\ln b) \tag{9-48}$$

式中　z_n——沉降计算深度。

在计算深度范围内存在基岩时，z_n 可取至基岩表面；当存在较厚的坚硬黏性土层，其空隙比小于 0.5、压缩模量大于 50MPa，或存在较厚的密实砂卵石层，其压缩模量大于 80MPa，z_n 可取至该层土表面，此时，计算地基最终变形量时，地基土附加压力分布应考虑相对硬层存在的影响，满足 GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》相应要求。

计算地基变形时，应考虑相邻荷载的影响，其值可按应力叠加原理，采用角点法计算。

（四）基础最终沉降量的计算例题

已知方形基础埋深 $h = 1.2\text{m}$，基础底面面积为 $1.5\text{m}\times1.5\text{m}$，轴心下压力 $F_v = 300\text{kN}$，地质条件如图 9-18 所列。试求基础的最终沉降量 S（$f_{ak} = 90\text{kPa}$）

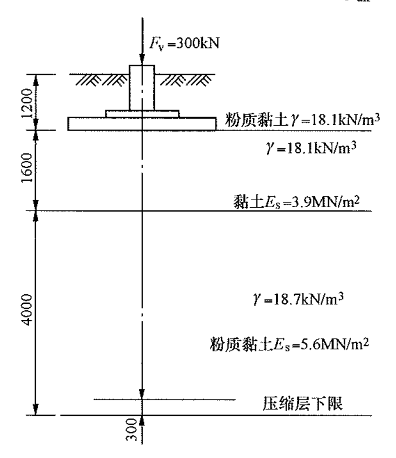


图 9-18　地质剖面示意图

计算基础最终沉降量的步骤：

（1）计算基础底面处的附加压力，取基础及其直上部分填土的平均容重 γ_D=20kN/m³，则基础底面的平均压力 P 为

$$P = F_v / A + \gamma_D h = 300/1.5^2 + 20\times1.2 = 157\text{kN/m}^2$$

基础底面处的附加压力 P_0 为

$$P_0 = P - \gamma h = 157 - 18.1\times1.2 = 135\text{kN/m}^2$$

（2）按沉降比法，设压缩层的厚度为 5.6m，上黏土层 1.6m，下粉质黏土层 4.0m。

（3）采用角点法，分成四小块计算基础中心各土层的计算变形值 ΔS：

1）黏土层：顶面及底面各位于基础底面下 $z = 0$，$z_1 = 1.6\text{m}$ 处：$l/b = 0.75/0.75 = 1$，$z/b = 0$，由表 9-37 查得 $\overline{\alpha}_0 = 0.25$；$l/b = 1.0$，$z_1/b = 1.6/0.75 = 2.13$，用插入法，由表 9-37 求得 $\overline{\alpha}_1 = 0.1689$。

将各值代入式（9-43），得黏土层的计算变形值为

$$\begin{aligned}\Delta S_1 &= 4\times\frac{P_0}{E_{si}}\left(z_i\overline{\alpha}_i - z_{i-1}\overline{\alpha}_{i-1}\right)\\ &= 4\times\frac{135}{3900}\times(1.6\times0.1689 - 0\times0.25)\\ &= 0.0374\text{m}\\ &= 3.74\text{cm}\end{aligned}$$

2）粉土层：$z_1 = 1.6\text{m}$，$z_2 = 5.6\text{m}$，$l/b = 1$，$z_2/b = 5.6/0.75 = 7.47$，由表 9-37 查得 $\overline{\alpha}_2 = 0.067$，则粉质黏土层的计算变形值 ΔS_2 为

$$\begin{aligned}\Delta S_2 &= 4\times\frac{135}{5600}\times(5.6\times0.067 - 1.6\times0.1689)\\ &= 0.01\text{m} = 1\text{cm}\end{aligned}$$

（4）确定压缩层厚度：根据表 9-18，得 $\Delta z = 0.3\text{m}$，计算 $z' = 5.6 - 0.3 = 5.3\text{m}$ 处的变形值。

$l/b = 1$，$z'/b = 5.3/0.75 = 7.07$，由表 9-37 查得 $\overline{\alpha}' = 0.07$，则

$$\begin{aligned}\Delta S_n &= 4\times\frac{135}{5600}\times(0.067\times5.6 - 0.07\times5.3)\\ &= 0.04\text{cm}\end{aligned}$$

代入式（9-47）得

$$\frac{\Delta S_n}{\sum_{i=1}^{n}\Delta S_i'} = \frac{0.04}{3.74 + 1.0} = 0.008\,4 < 0.025$$

故压缩层厚度可取 5.6m（从基础底面起算），与原假设相同。

（5）确定沉降计算经验系数 ψ_s

$$\begin{aligned}\overline{E}_s &= \frac{\sum_{i=1}^{n}A_i}{\sum_{i=1}^{n}A_i/E_{si}}\\ &= \frac{P_0\left(4z_2\overline{\alpha}_2 - 4z\overline{\alpha}_0\right)}{P_0\left(\dfrac{4z_1\overline{\alpha}_1 - 4z\overline{\alpha}_0}{E_{s1}} + \dfrac{4z_2\overline{\alpha}_2 - 4z_1\overline{\alpha}_1}{E_{s2}}\right)}\\ &= \frac{4\times5.6\times0.067 - 0}{\dfrac{4\times1.6\times0.1689 - 0}{3900} + \dfrac{4\times5.6\times0.067 - 4\times1.6\times0.1689}{5600}}\\ &= 4263.6\text{kN/m}^2\end{aligned}$$

由 $p_0 \geqslant f_{ak}$ 查表 9-17，得 $\psi_s = 1.274$，最终沉降量为

$$s = \psi_s\sum_{i=1}^{n}\Delta S_i = 1.274\times(3.74 + 1.0) = 6.03\text{cm}$$

四、地基承载力

地基承载力特征值应由荷载试验或其他原位测试、计算并结合工程实践经验等方法综合确定。在无资料时，未修正的地基承载力特征值 f_{ak} 可参考表 9-21～表 9-35。当基础宽度大于 3m 或埋置深度大于

0.5m 时，地基承载力特征值尚应按下式修正：

$$f_a = f_{ak} + \eta_b \gamma (b-3) + \eta_d \gamma_s (h-0.5) \quad (9\text{-}49)$$

式中 f_a ——修正后的地基承载力特征值，kPa；

f_{ak} ——地基承载力特征值，kPa；

η_b、η_d ——基础宽度和埋深的地基承载力修正系数，按基底下土的类别查表 9-19 确定；

γ ——基础底面以下土的重度，地下水位以下取浮重度，kN/m³；

b ——基础底面宽度，当基宽小于 3m 时按 3m 取值，大于 6m 时按 6m 取值，对长方形底面取短边、圆形底面取 $\sqrt{A}$（A 为底面面积），m；

h ——基础埋深，m。

表 9-19 承载力修正系数

土的类别		宽度修正系数 η_b	深度修正系数 η_d
淤泥和淤泥质土		0	1.0
人工填土 e 或 I_L 不小于 0.85 的黏性土		0	1.0
红黏土	含水比 α_w >0.8	0	1.2
	含水比 α_w ≤0.8	0.15	1.4
大面积压实填土	压实系数大于 0.95、黏粒含量 ρ_c ≥10%的粉土	0	1.5
	最大干密度大于 2100kg/m³ 的级配砂石	0	2.0
粉土	黏粒含量 ρ_c ≥10%的粉土	0.3	1.5
	黏粒含量 ρ_c <10%的粉土	0.5	2.0
e 及 I_L 均小于 0.85 的黏性土		0.3	1.6
粉砂、细砂（不包括很湿与饱和时的稍密状态）		2.0	3.0
中砂、粗砂、砾砂和碎石土		3.0	4.4

注 强风化和全风化的岩石，可参照所风化成的相应土类取值，其他状态下的岩石不修正。

悬垂塔地基承载力特征值也可根据土的抗剪强度指标按式（9-50）计算，并应满足变形要求：

$$f_a = M_b \gamma b + M_d \gamma_s h + M_c c \quad (9\text{-}50)$$

式中 M_b、M_d、M_c ——承载力系数，按表 9-20 确定；

b ——基础底面宽度，大于 6m 时按 6m 取值，对于砂土小于 3m 时按 3m 取值，m；

c ——基底下一倍短边宽的深度范围内土的黏聚力标准值，kPa。

表 9-20 承载力系数 M_b、M_d、M_c

基底下一倍短边宽的深度范围内土的内摩擦角标准值（°）	M_b	M_d	M_c
0	0	1.00	3.14
2	0.03	1.12	3.32
4	0.06	1.25	3.51
6	0.10	1.39	3.71
8	0.14	1.55	3.93
10	0.18	1.73	4.17
12	0.23	1.94	4.42
14	0.29	2.17	4.69
16	0.36	2.43	5.00
18	0.43	2.72	5.31
20	0.51	3.06	5.66
22	0.61	3.44	6.04
24	0.80	3.87	6.45
26	1.10	4.37	6.90
28	1.40	4.93	7.40
30	1.90	5.59	7.95
32	2.60	6.35	8.55
34	3.40	7.21	9.22
36	4.20	8.25	9.97
38	5.00	9.44	10.80
40	5.80	10.84	11.73

五、地基承载力特征值

地基承载力特征值应由工程地质资料提供，当无资料时可以参照表 9-21～表 9-35 分别确定。

表 9-21 岩石承载力特征值 kPa

岩石类别	强风化	中等风化	微风化
硬质岩石	500～1000	1500～2500	≥4000
软质岩石	200～500	700～1200	1500～2000

注 1. 对于微风化的硬质岩石，其承载力如大于 4000kPa 时，应由试验确定。

2. 对于强风化的岩石，当与残积土难于区分时按土考虑。

表 9-22 碎石土承载力特征值 kPa

土的名称	稍密	中密	密实
卵石	300～500	500～800	800～1000
碎石	250～400	400～700	700～900
圆砾	200～300	300～500	500～700
角砾	200～250	250～400	400～600

注 1. 表中数值适用于骨架颗粒空隙全部由中砂、粗砂或硬塑、坚硬状态的黏性土或稍湿的粉土所充填。

2. 当粗颗粒为中等风化或强风化时，可按其风化程度适当降低承载力，当颗粒间呈半胶结状时，可适当提高承载力。

表 9-23 粉土承载力特征值 kPa

第二指标 含水量（%） / 第一指标孔隙比	10	15	20	25	30	35	40
0.5	410	390	（365）				
0.6	310	300	280	（270）			
0.7	250	240	225	215	（205）		
0.8	200	190	180	170	（165）		
0.9	160	150	145	140	130	（125）	
1.0	130	125	120	115	110	105	（100）

注 1. 有括号者仅供内插用。

2. 有湖、塘、沟、谷与河漫滩地段，新近沉积的粉土，其工程性质一般较差，应根据当地实践经验取值。

表 9-24 黏性土承载力特征值 kPa

第二指标液性指数 / 第一指标孔隙比	0	0.25	0.50	0.75	1.00	1.20
0.5	475	430	390	（360）		
0.6	400	360	325	295	（265）	
0.7	325	295	265	240	210	
0.8	275	240	220	200	170	170
0.9	230	210	190	170	135	135
1.0	200	180	160	135	115	105
1.1		160	135	115	105	

注 1. 有括号者仅供内插用。

2. 在有湖、塘、沟、谷与河漫滩地段新近沉积的黏性土，其工程性能一般较差。第四纪晚更新世（Q3）及其以前沉积的老黏性土，其工程性能通常较好。这些土均应根据当地实践经验取值。

表 9-25 沿海地区淤泥和淤泥质土承载力特征值 kPa

天然含水量（%）	36	40	45	50	55	65	75
承载力特征值	100	90	80	70	60	50	40

注 对于内陆淤泥和淤泥质土，可参照使用。

表 9-26 红黏土承载力特征值 kPa

土的名称	第一指标含水比 $a=W/W_L$ / 第二指标液塑比	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
红黏土	$I_r=W_L/W_P \leqslant 1.7$	380	270	210	180	150	140
红黏土	$I_r=W_L/W_P \geqslant 2.3$	280	200	160	130	110	100
次生红黏土		250	190	150	130	110	100

注 本表仅适用于定义范围内的红黏土。

表 9-27 素填土承载力特征值 kPa

压缩模量 E_{S1-2}	7	5	4	3	2
承载力特征值	160	135	115	85	65

注 本表只适用于堆填时间超过十年的黏性土，以及超过五年的粉土。

表 9-28 砂土承载力特征值 kPa

标准贯入试验锤击数 N / 土类	10	15	30	50
中粗砂	180	250	340	500
粉细砂	140	180	250	340

表 9-29 黏性土承载力特征值 kPa

标准贯入试验锤击数 N	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23
承载力特征值	105	145	190	235	280	325	370	430	515	600	680

表 9-30 黏性土承载力特征值 kPa

标准贯入试验锤击数 N_{10}	15	20	25	30
承载力特征值	105	145	190	230

表 9-31 素填土承载力特征值 kPa

标准贯入试验锤击数 N_{10}	10	20	30	40
承载力特征值	85	115	135	160

注 本表只适用于黏性土与粉土组成的素填土。

表 9-32 压实填土地基承载力特征值 kPa

填土类别	压实系数 λ_c	承载力特征值
碎石、卵石	0.94～0.97	200～300
砂夹石（其中碎石、卵石占全重 30%～50%）		200～250
土夹石（其中碎石、卵石占全重 30%～50%）		150～200
粉质黏土（$8 \leqslant I_p < 14$）、粉土		130～180

表 9-33 花岗岩类残积土承载力特征值 kPa

土名称 \ 标准贯入试验锤击数 N	4～10	10～15	15～20	20～30
砾质黏性土	（100）～250	250～300	300～350	350～（400）
砂质黏性土	（80）～200	200～250	250～300	300～（350）

续表

土名称 \ 标准贯入试验锤击数 N	4～10	10～15	15～20	20～30
黏性土	150～200	200～240	240～（270）	

注 1. 括号内的数值供内插用。

2. 当大于 2mm 颗粒质量大于或等于总质量的 20%者定为砾质黏性土，小于 20%者定为砂质黏性土，不含者为黏性土。

表 9-34 粗粒混合土承载力特征值 kPa

干密度	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	—
承载力特征值	170	200	240	300	380	480	620	—

表 9-35 细粒混合土承载力特征值 kPa

孔隙比	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
承载力特征值	190	200	210	230	250	270	320	400

表 9-36 矩形面积上均布荷载作用下角点附加应力系数 α

z/b \ l/b	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	10.0	条形
0.0	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500
0.2	0.249	0.249	0.249	0.249	0.249	0.249	0.249	0.249	0.249	0.249	0.249	0.249
0.4	0.240	0.242	0.243	0.243	0.244	0.244	0.244	0.244	0.244	0.244	0.244	0.244
0.6	0.223	0.228	0.230	0.232	0.232	0.233	0.234	0.234	0.234	0.234	0.234	0.234
0.8	0.200	0.207	0.212	0.215	0.216	0.218	0.220	0.220	0.220	0.220	0.220	0.220
1.0	0.175	0.185	0.191	0.195	0.198	0.200	0.203	0.204	0.204	0.204	0.205	0.205
1.2	0.152	0.163	0.171	0.176	0.179	0.182	0.187	0.188	0.189	0.189	0.189	0.189
1.4	0.131	0.142	0.151	0.157	0.161	0.164	0.171	0.173	0.174	0.174	0.174	0.174
1.6	0.112	0.124	0.133	0.140	0.145	0.148	0.157	0.159	0.160	0.160	0.160	0.160
1.8	0.097	0.108	0.117	0.124	0.129	0.133	0.143	0.146	0.147	0.148	0.148	0.148
2.0	0.084	0.095	0.103	0.110	0.116	0.120	0.131	0.135	0.136	0.137	0.137	0.137
2.2	0.073	0.083	0.092	0.098	0.104	0.108	0.121	0.125	0.126	0.127	0.128	0.128
2.4	0.064	0.073	0.081	0.088	0.093	0.098	0.111	0.116	0.118	0.118	0.119	0.119
2.6	0.057	0.065	0.072	0.079	0.084	0.089	0.102	0.107	0.110	0.111	0.112	0.112
2.8	0.050	0.058	0.065	0.071	0.076	0.080	0.094	0.100	0.102	0.104	0.105	0.105
3.0	0.045	0.052	0.058	0.064	0.069	0.073	0.087	0.093	0.096	0.097	0.099	0.099

续表

z/b \ l/b	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	10.0	条形
3.2	0.040	0.047	0.053	0.058	0.063	0.067	0.081	0.087	0.090	0.092	0.093	0.094
3.4	0.036	0.042	0.048	0.053	0.057	0.061	0.075	0.081	0.085	0.086	0.088	0.089
3.6	0.033	0.038	0.043	0.048	0.052	0.056	0.059	0.076	0.080	0.082	0.084	0.084
3.8	0.030	0.035	0.040	0.044	0.048	0.052	0.055	0.072	0.075	0.077	0.080	0.080
4.0	0.027	0.032	0.035	0.040	0.044	0.048	0.050	0.067	0.071	0.073	0.076	0.076
4.2	0.025	0.029	0.033	0.037	0.041	0.044	0.056	0.063	0.067	0.070	0.072	0.073
4.4	0.023	0.027	0.031	0.034	0.038	0.041	0.053	0.060	0.064	0.066	0.069	0.070
4.6	0.021	0.025	0.028	0.032	0.035	0.038	0.049	0.056	0.061	0.063	0.066	0.067
4.8	0.019	0.023	0.026	0.029	0.032	0.035	0.046	0.053	0.058	0.060	0.064	0.064
5.0	0.018	0.021	0.024	0.027	0.030	0.033	0.043	0.050	0.055	0.057	0.061	0.062
6.0	0.013	0.015	0.017	0.020	0.022	0.024	0.033	0.039	0.043	0.046	0.051	0.052
7.0	0.009	0.011	0.013	0.015	0.016	0.018	0.025	0.031	0.035	0.038	0.043	0.045
8.0	0.007	0.009	0.010	0.011	0.013	0.014	0.020	0.025	0.028	0.031	0.037	0.039
9.0	0.005	0.007	0.008	0.009	0.010	0.011	0.016	0.020	0.024	0.026	0.032	0.035
10.0	0.005	0.006	0.007	0.007	0.008	0.009	0.013	0.017	0.020	0.022	0.028	0.032
12.0	0.003	0.004	0.005	0.005	0.006	0.006	0.009	0.012	0.014	0.017	0.022	0.026
14.0	0.002	0.003	0.003	0.004	0.004	0.005	0.007	0.009	0.011	0.013	0.018	0.023
16.0	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	0.004	0.005	0.007	0.009	0.010	0.014	0.020
18.0	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003	0.002	0.004	0.006	0.007	0.008	0.012	0.018
20.0	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.004	0.005	0.006	0.007	0.010	0.016
25.0	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.004	0.004	0.007	0.013
30.0	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003	0.005	0.011
35.0	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.004	0.009
40.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003	0.008

注　l—基础长度，m；b—基础宽度，m；z—计算点离基础底面垂直距离，m。

表 9-37　　矩形面积上均布荷载作用下角点的平均附加应力系数 $\bar{\alpha}$

z/b \ l/b	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.4	2.8	3.2	3.6	4.0	5.0	10.0
0.0	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500
0.2	0.2496	0.2497	0.2497	0.2498	0.2498	0.2498	0.2498	0.2498	0.2498	0.2498	0.2498	0.2498	0.2498

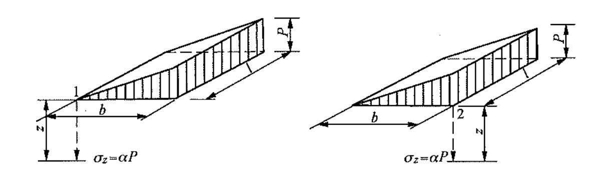
续表

z/b \ l/b	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.4	2.8	3.2	3.6	4.0	5.0	10.0
0.4	0.2474	0.2479	0.2481	0.2483	0.2483	0.2484	0.2485	0.2485	0.2485	0.2485	0.2485	0.2485	0.2485
0.6	0.2423	0.2437	0.2444	0.2448	0.2451	0.2452	0.2454	0.2455	0.2455	0.2455	0.2455	0.2455	0.2456
0.8	0.2346	0.2372	0.2387	0.2395	0.2400	0.2403	0.2407	0.2408	0.2409	0.2409	0.2410	0.2410	0.2410
1.0	0.2252	0.2291	0.2313	0.2326	0.2335	0.2340	0.2346	0.2349	0.2351	0.2352	0.2352	0.2353	0.2353
1.2	0.2149	0.2199	0.2229	0.2248	0.2260	0.2268	0.2278	0.2282	0.2285	0.2286	0.2287	0.2288	0.2289
1.4	0.2043	0.2102	0.2140	0.2164	0.2180	0.2191	0.2204	0.2211	0.2215	0.2217	0.2218	0.2220	0.2221
1.6	0.1939	0.2006	0.2049	0.2079	0.2099	0.2113	0.2130	0.2138	0.2143	0.1146	0.2148	0.2150	0.2152
1.8	0.1840	0.1912	0.1960	0.1994	0.2018	0.2034	0.2055	0.2066	0.2073	0.2077	0.2079	0.2082	0.2084
2.0	0.1764	0.1822	0.1875	0.1912	0.1938	0.1958	0.1982	0.1996	0.2004	0.2009	0.2012	0.2015	0.2018
2.2	0.1659	0.1737	0.1793	0.1833	0.1862	0.1883	0.1911	0.1927	0.1937	0.1943	0.1947	0.1952	0.1955
2.4	0.1578	0.1657	0.1715	0.1757	0.1789	0.1812	0.1843	0.1862	0.1873	0.1880	0.1885	0.1890	0.1895
2.6	0.1503	0.1583	0.1642	0.1686	0.1719	0.1745	0.1779	0.1799	0.1812	0.1820	0.1825	0.1832	0.1838
2.8	0.1433	0.1514	0.1574	0.1619	0.1654	0.1680	0.1717	0.1739	0.1753	0.1763	0.1769	0.1777	0.1784
3.0	0.1369	0.1449	0.1510	0.1556	0.1592	0.1619	0.1658	0.1682	0.1698	0.1708	0.1715	0.1725	0.1733
3.2	0.1310	0.1390	0.1450	0.1497	0.1533	0.1562	0.1602	0.1628	0.1645	0.1657	0.1664	0.1675	0.1685
3.4	0.1256	0.1334	0.1394	0.1441	0.1478	0.1508	0.1550	0.1577	0.1595	0.1607	0.1616	0.1628	0.1639
3.6	0.1205	0.1282	0.1342	0.1389	0.1427	0.1456	0.1500	0.1528	0.1548	0.1561	0.1570	0.1583	0.1595
3.8	0.1158	0.1234	0.1233	0.1340	0.1378	0.1408	0.1452	0.1482	0.1502	0.1516	0.1526	0.1541	0.1554
4.0	0.1114	0.1189	0.1248	0.1294	0.1332	0.1352	0.1408	0.1438	0.1459	0.1474	0.1485	0.1500	0.1516
4.2	0.1073	0.1147	0.1205	0.1251	0.1289	0.1319	0.1365	0.1396	0.1418	0.1434	0.1445	0.1462	0.1479
4.4	0.1035	0.1107	0.1164	0.1210	0.1248	0.1279	0.1325	0.1357	0.1379	0.1396	0.1407	0.1425	0.1444
4.6	0.1000	0.1070	0.1127	0.1172	0.1209	0.1240	0.1287	0.1319	0.1342	0.1359	0.1371	0.1390	0.1410
4.8	0.0967	0.1036	0.1091	0.1136	0.1173	0.1204	0.1250	0.1283	0.1307	0.1324	0.1337	0.1357	0.1379
5.0	0.0935	0.1003	0.1057	0.1102	0.1139	0.1169	0.1216	0.1249	0.1273	0.1291	0.1304	0.1325	0.1348
5.2	0.0906	0.0972	0.1026	0.1070	0.1106	0.1136	0.1183	0.1217	0.1241	0.1259	0.1273	0.1295	0.1320
5.4	0.0878	0.0943	0.0936	0.1039	0.1075	0.1105	0.1152	0.1186	0.1211	0.1229	0.1243	0.1265	0.1292
5.6	0.0852	0.0916	0.0968	0.1010	0.1046	0.1076	0.1122	0.1156	0.1181	0.1200	0.1215	0.1238	0.1266
5.8	0.0828	0.0890	0.0941	0.0983	0.1018	0.1047	0.1094	0.1128	0.1153	0.1172	0.1187	0.1211	0.1240

续表

z/b \ l/b	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.4	2.8	3.2	3.6	4.0	5.0	10.0
6.0	0.0805	0.0866	0.0916	0.0957	0.0991	0.1021	0.1067	0.1101	0.1126	0.1146	0.1161	0.1185	0.1216
6.2	0.0783	0.0842	0.0891	0.0932	0.0966	0.0995	0.1041	0.1075	0.1101	0.1120	0.1136	0.1161	0.1193
6.4	0.0762	0.0820	0.0869	0.0909	0.0942	0.0971	0.1016	0.1050	0.1076	0.1096	0.1111	0.1137	0.1171
6.6	0.0742	0.0799	0.0847	0.0886	0.0919	0.0948	0.0993	0.1027	0.1053	0.1073	0.1088	0.1114	0.1149
6.8	0.0723	0.0799	0.0826	0.0865	0.0898	0.0926	0.0970	0.1004	0.1030	0.1050	0.1066	0.1092	0.1129
7.0	0.0705	0.0761	0.0806	0.0844	0.0877	0.0904	0.0949	0.0982	0.1008	0.1028	0.1044	0.1071	0.1109
7.2	0.0688	0.0742	0.0787	0.0825	0.0857	0.0884	0.0928	0.0962	0.0987	0.1008	0.1023	0.1051	0.1090
7.4	0.0672	0.0725	0.0769	0.0806	0.0838	0.0865	0.0908	0.0942	0.0967	0.0988	0.1004	0.1031	0.1071
7.6	0.0656	0.0709	0.0752	0.0789	0.0820	0.0846	0.0889	0.0922	0.0948	0.0968	0.0984	0.1012	0.1054
7.8	0.0642	0.0693	0.0736	0.0771	0.0802	0.0828	0.0871	0.0904	0.0929	0.0950	0.0966	0.0994	0.1036
8.0	0.0627	0.0678	0.0720	0.0755	0.0785	0.0811	0.0853	0.0886	0.0912	0.0932	0.0948	0.0976	0.1020
8.2	0.0614	0.0663	0.0705	0.0739	0.0769	0.0795	0.0837	0.0869	0.0894	0.0914	0.0931	0.0959	0.1004
8.4	0.0601	0.0649	0.0690	0.0724	0.0754	0.0779	0.0820	0.0852	0.0878	0.0893	0.0914	0.0943	0.0938
8.6	0.0558	0.0636	0.0676	0.0710	0.0739	0.0764	0.0805	0.0836	0.0862	0.0882	0.0898	0.0927	0.0973
8.8	0.0576	0.0623	0.0663	0.0696	0.0724	0.0749	0.0790	0.0821	0.0846	0.0866	0.0882	0.0912	0.0959
9.2	0.0554	0.0599	0.0637	0.0670	0.0697	0.0721	0.0761	0.0792	0.0817	0.0837	0.0853	0.0882	0.0931
9.6	0.0533	0.0577	0.0614	0.0645	0.0672	0.0696	0.0734	0.0765	0.0789	0.0809	0.0825	0.0855	0.0905
10.0	0.0514	0.0556	0.0592	0.0622	0.0649	0.0762	0.0710	0.0739	0.0763	0.0783	0.0799	0.0829	0.0880
10.4	0.0496	0.0537	0.0572	0.0601	0.0627	0.0649	0.0686	0.0716	0.0739	0.0759	0.0775	0.0804	0.0857
10.8	0.0479	0.0519	0.0553	0.0581	0.0606	0.0628	0.0664	0.0693	0.0717	0.0736	0.0751	0.0781	0.0843
11.2	0.0463	0.0502	0.0535	0.0563	0.0587	0.0609	0.0644	0.0672	0.0695	0.0714	0.0730	0.0759	0.0813
11.6	0.0448	0.0486	0.0518	0.0545	0.0569	0.0590	0.0625	0.0652	0.0675	0.0694	0.0709	0.0738	0.0793
12.0	0.0435	0.0471	0.0502	0.0529	0.0552	0.0573	0.0606	0.0634	0.0656	0.0674	0.0690	0.0719	0.0774
12.8	0.0409	0.04444	0.0474	0.0499	0.0521	0.0541	0.0573	0.0599	0.0621	0.0639	0.0654	0.0682	0.0739
13.6	0.0387	0.0420	0.0448	0.0472	0.0493	0.0512	0.0543	0.0568	0.0589	0.0607	0.0621	0.0649	0.0707
14.4	0.0367	0.0398	0.0425	0.0448	0.0468	0.0486	0.0516	0.0540	0.0561	0.0577	0.0592	0.0619	0.0677
15.2	0.0349	0.0379	0.0404	0.0426	0.0446	0.0463	0.0492	0.0515	0.0535	0.0551	0.0565	0.0592	0.0650
16.0	0.0332	0.0361	0.0385	0.0407	0.0425	0.0442	0.0469	0.0492	0.0511	0.0527	0.0540	0.0567	0.0625
18.0	0.0297	0.0323	0.0345	0.0364	0.0381	0.0396	0.0422	0.0442	0.0460	0.0475	0.0487	0.0512	0.0570
20.0	0.0269	0.0292	0.0312	0.0330	0.0345	0.0359	0.0383	0.0402	0.0418	0.0432	0.0444	0.0468	0.0524

表 9-38 矩形面积上三角形分布荷载作用下的附加应力系数 α 与平均附加应力系数 $\bar{\alpha}$



$\frac{z}{b}$	$\frac{l}{b}=0.2$				$\frac{l}{b}=0.4$				$\frac{l}{b}=0.6$			
	点 1		点 2		点 1		点 2		点 1		点 2	
	α	$\bar{\alpha}$	α	$\bar{\alpha}$	α	$\bar{\alpha}$	α	$\bar{\alpha}$	α	$\bar{\alpha}$	α	$\bar{\alpha}$
0.0	0.0000	0.0000	0.2500	0.2500	0.0000	0.0000	0.2500	0.2500	0.0000	0.0000	0.2500	0.2500
0.2	0.0223	0.0112	0.1821	0.2161	0.0280	0.0140	0.2115	0.2308	0.0296	0.0148	0.2165	0.2333
0.4	0.0269	0.0179	0.1094	0.1810	0.0420	0.0245	0.1604	0.2084	0.0487	0.0270	0.1781	0.2153
0.6	0.0259	0.0207	0.0700	0.1505	0.0448	0.0308	0.1165	0.1851	0.0560	0.0355	0.1405	0.1966
0.8	0.0232	0.0217	0.0480	0.1277	0.0421	0.0340	0.0853	0.1640	0.0553	0.0405	0.1093	0.1787
1.0	0.0201	0.0217	0.0346	0.1104	0.0375	0.0351	0.0638	0.1461	0.0508	0.0430	0.0352	0.1624
1.2	0.0171	0.0212	0.0260	0.0970	0.0324	0.0351	0.0491	0.1312	0.0450	0.0439	0.0673	0.1480
1.4	0.0145	0.0204	0.0202	0.0865	0.0278	0.0344	0.0386	0.1187	0.0392	0.0436	0.0540	0.1356
1.6	0.0123	0.0195	0.0160	0.0779	0.0238	0.0333	0.0310	0.1082	0.0339	0.0427	0.0440	0.1247
1.8	0.0105	0.0186	0.0130	0.0709	0.0204	0.0321	0.0254	0.0993	0.0294	0.0415	0.0363	0.1153
2.0	0.0090	0.0178	0.0108	0.0650	0.0176	0.0308	0.0211	0.0917	0.0255	0.0401	0.0304	0.1071
2.5	0.0063	0.0157	0.0072	0.0538	0.0125	0.0276	0.0140	0.0769	0.0183	0.0365	0.0205	0.0908
3.0	0.0046	0.0140	0.0051	0.0458	0.0092	0.0248	0.0100	0.0661	0.0135	0.0330	0.0148	0.0786
5.0	0.0018	0.0097	0.0019	0.0289	0.0036	0.0175	0.0038	0.0424	0.0054	0.0236	0.0056	0.0476
7.0	0.0009	0.0073	0.0010	0.0211	0.0019	0.0133	0.0019	0.0311	0.0028	0.0180	0.0029	0.0352
10.0	0.0005	0.0053	0.0004	0.0150	0.0009	0.0097	0.0010	0.0222	0.0014	0.0133	0.0014	0.0253

$\frac{z}{b}$	$\frac{l}{b}=0.8$				$\frac{l}{b}=1.0$				$\frac{l}{b}=1.2$			
	点 1		点 2		点 1		点 2		点 1		点 2	
	α	$\bar{\alpha}$	α	$\bar{\alpha}$	α	$\bar{\alpha}$	α	$\bar{\alpha}$	α	$\bar{\alpha}$	α	$\bar{\alpha}$
0.0	0.0000	0.0000	0.2500	0.2500	0.0000	0.0000	0.2500	0.2500	0.0000	0.0000	0.2500	0.2500
0.2	0.0301	0.0151	0.2178	0.2339	0.0304	0.0152	0.2182	0.2341	0.0305	0.0153	0.2184	0.2342
0.4	0.0517	0.0280	0.1844	0.2175	0.0531	0.0285	0.1870	0.2184	0.0539	0.0288	0.1881	0.2187
0.6	0.0621	0.0376	0.1520	0.2011	0.0654	0.0388	0.1575	0.2030	0.0673	0.0394	0.1602	0.2039
0.8	0.0637	0.0440	0.1232	0.1852	0.0688	0.0459	0.1311	0.1883	0.0720	0.0470	0.1355	0.1899
1.0	0.0602	0.0476	0.0996	0.1704	0.0666	0.0502	0.1086	0.1746	0.0708	0.0518	0.1143	0.1769
1.2	0.0546	0.0492	0.0807	0.1571	0.0615	0.0525	0.0901	0.1621	0.0664	0.0546	0.0962	0.1649
1.4	0.0483	0.0495	0.0661	0.1451	0.0554	0.0534	0.0751	0.1507	0.0606	0.0559	0.0817	0.1541
1.6	0.0424	0.0490	0.0547	0.1345	0.0492	0.0533	0.0628	0.1405	0.0545	0.0561	0.0696	0.1443
1.8	0.0371	0.0480	0.0457	0.1252	0.0435	0.0525	0.0534	0.1313	0.0487	0.0556	0.0596	0.1354
2.0	0.0324	0.0467	0.0387	0.1169	0.0384	0.0513	0.0456	0.1232	0.0434	0.0547	0.0513	0.1274
2.5	0.0236	0.0429	0.0265	0.1000	0.0284	0.0478	0.0318	0.1063	0.0326	0.0513	0.0365	0.1107
3.0	0.0176	0.0392	0.0192	0.0871	0.0214	0.0439	0.0233	0.0931	0.0249	0.0476	0.0270	0.0976
5.0	0.0071	0.0285	0.0074	0.0576	0.0088	0.0324	0.0091	0.0624	0.0104	0.0356	0.0108	0.0661
7.0	0.0038	0.0219	0.0038	0.0427	0.0047	0.0251	0.0047	0.0465	0.0056	0.0277	0.0056	0.0496
10.0	0.0019	0.0162	0.0019	0.0308	0.0023	0.0186	0.0024	0.0336	0.0028	0.0207	0.0028	0.0359

续表

$\frac{z}{b}$	$\frac{l}{b}=1.4$				$\frac{l}{b}=1.6$				$\frac{l}{b}=1.8$			
	点 1		点 2		点 1		点 2		点 1		点 2	
	α	$\bar{\alpha}$	α	$\bar{\alpha}$	α	$\bar{\alpha}$	α	$\bar{\alpha}$	α	$\bar{\alpha}$	α	$\bar{\alpha}$
0.0	0.0000	0.0000	0.2500	0.2500	0.0000	0.0000	0.2500	0.2500	0.0000	0.0000	0.2500	0.2500
0.2	0.0305	0.0153	0.2185	0.2343	0.0306	0.0153	0.2185	0.2343	0.0306	0.0153	0.2185	0.2343
0.4	0.0543	0.0289	0.1886	0.2189	0.0545	0.0290	0.1889	0.2190	0.0546	0.0290	0.1891	0.2190
0.6	0.0684	0.0397	0.1616	0.2043	0.0690	0.0399	0.1625	0.2046	0.0694	0.0400	0.1630	0.2047
0.8	0.0739	0.0476	0.1381	0.1907	0.0751	0.0480	0.1396	0.1912	0.0759	0.0482	0.1405	0.1915
1.0	0.0735	0.0528	0.1176	0.1781	0.0753	0.0534	0.1202	0.1789	0.0766	0.0538	0.1215	0.1794
1.2	0.0698	0.0560	0.1007	0.1666	0.0721	0.0568	0.1037	0.1678	0.0738	0.0574	0.1055	0.1684
1.4	0.0644	0.0575	0.0864	0.1562	0.0672	0.0586	0.0897	0.1576	0.0692	0.0594	0.0921	0.1585
1.6	0.0586	0.0580	0.0743	0.1467	0.0616	0.0594	0.0780	0.1484	0.0639	0.0603	0.0806	0.1494
1.8	0.0528	0.0578	0.0644	0.1381	0.0560	0.0593	0.0681	0.1400	0.0585	0.0604	0.0709	0.1413
2.0	0.0474	0.0570	0.0560	0.1303	0.0507	0.0587	0.0596	0.1324	0.0533	0.0599	0.0625	0.1338
2.5	0.0362	0.0540	0.0405	0.1139	0.0393	0.0560	0.0440	0.1163	0.0419	0.0575	0.0469	0.1180
3.0	0.0280	0.0503	0.0303	0.1008	0.0307	0.0525	0.0333	0.1033	0.0331	0.0541	0.0359	0.1052
5.0	0.0120	0.0382	0.0123	0.0690	0.0135	0.0403	0.0139	0.0714	0.0148	0.0421	0.0154	0.0734
7.0	0.0064	0.0299	0.0066	0.0520	0.0073	0.0318	0.0074	0.0541	0.0081	0.0333	0.0083	0.0558
10.0	0.0033	0.0224	0.0032	0.0379	0.0037	0.0239	0.0037	0.0395	0.0041	0.0252	0.0042	0.0409

$\frac{z}{b}$	$\frac{l}{b}=2.0$				$\frac{l}{b}=3.0$				$\frac{l}{b}=4.0$			
	点 1		点 2		点 1		点 2		点 1		点 2	
	α	$\bar{\alpha}$	α	$\bar{\alpha}$	α	$\bar{\alpha}$	α	$\bar{\alpha}$	α	$\bar{\alpha}$	α	$\bar{\alpha}$
0.0	0.0000	0.0000	0.2500	0.2500	0.0000	0.0000	0.2500	0.2500	0.0000	0.0000	0.2500	0.2500
0.2	0.0306	0.0153	0.2185	0.2343	0.0306	0.0153	0.2186	0.2343	0.0306	0.0153	0.2186	0.2343
0.4	0.0547	0.0290	0.1892	0.2191	0.0548	0.0290	0.1894	0.2192	0.0549	0.0291	0.1894	0.2192
0.6	0.0696	0.0401	0.1633	0.2048	0.0701	0.0402	0.1638	0.2050	0.0702	0.0402	0.1639	0.2050
0.8	0.0764	0.0483	0.1412	0.1917	0.0773	0.0486	0.1423	0.1920	0.0776	0.0487	0.1424	0.1920
1.0	0.0774	0.0540	0.1225	0.1797	0.0790	0.0545	0.1244	0.1803	0.0794	0.0546	0.1248	0.1803
1.2	0.0749	0.0577	0.1069	0.1689	0.0774	0.0584	0.1096	0.1697	0.0779	0.0586	0.1103	0.1699
1.4	0.0707	0.0599	0.0937	0.1591	0.0739	0.0609	0.0973	0.1603	0.0748	0.0612	0.0982	0.1605
1.6	0.0656	0.0609	0.0826	0.1502	0.0697	0.0623	0.0870	0.1517	0.0708	0.0626	0.0882	0.1521
1.8	0.0604	0.0611	0.0730	0.1422	0.0352	0.0628	0.0782	0.1441	0.0666	0.0633	0.0797	0.1445
2.0	0.0553	0.0608	0.0649	0.1348	0.0607	0.0629	0.0707	0.1371	0.0624	0.0634	0.0726	0.1377
2.5	0.0440	0.0586	0.0491	0.1193	0.0504	0.0614	0.0559	0.1223	0.0529	0.0623	0.0585	0.1233
3.0	0.0352	0.0554	0.0380	0.1067	0.0419	0.0589	0.0451	0.1104	0.0449	0.0600	0.0482	0.1116
5.0	0.0161	0.0435	0.0167	0.0749	0.0214	0.0480	0.0221	0.0797	0.0248	0.0500	0.0256	0.0817
7.0	0.0089	0.0347	0.0091	0.0572	0.0124	0.0391	0.0126	0.0619	0.0152	0.0414	0.0154	0.0642
10.0	0.0046	0.0263	0.0046	0.0403	0.0066	0.0302	0.0066	0.0462	0.0084	0.0325	0.0083	0.0485

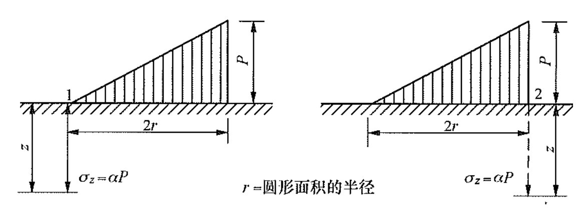
续表

$\frac{z}{b}$	$\frac{l}{b}=6.0$				$\frac{l}{b}=8.0$				$\frac{l}{b}=10.0$			
	点 1		点 2		点 1		点 2		点 1		点 2	
	α	$\bar{\alpha}$	α	$\bar{\alpha}$	α	$\bar{\alpha}$	α	$\bar{\alpha}$	α	$\bar{\alpha}$	α	$\bar{\alpha}$
0.0	0.0000	0.0000	0.2500	0.2500	0.0000	0.0000	0.2500	0.2500	0.0000	0.0000	0.2500	0.2500
0.2	0.0306	0.0153	0.2186	0.2343	0.0306	0.0153	0.2186	0.2343	0.0306	0.0153	0.2186	0.2343
0.4	0.0549	0.0291	0.1894	0.2192	0.0549	0.0291	0.1894	0.2192	0.0549	0.0291	0.1894	0.2192
0.6	0.0702	0.0402	0.1640	0.2050	0.0702	0.0402	0.1640	0.2050	0.0702	0.0403	0.1640	0.2050
0.8	0.0776	0.0487	0.1426	0.1921	0.0776	0.0487	0.1426	0.1921	0.0776	0.0487	0.1426	0.1921
1.0	0.0795	0.0546	0.1250	0.1804	0.0796	0.0546	0.1250	0.1804	0.0796	0.0546	0.1250	0.1804
1.2	0.0782	0.0587	0.1105	0.1700	0.0783	0.0587	0.1105	0.1700	0.0783	0.0587	0.1105	0.1700
1.4	0.0752	0.0613	0.0986	0.1606	0.0752	0.0613	0.0987	0.1606	0.0753	0.0613	0.0987	0.1606
1.6	0.0714	0.0628	0.0887	0.1523	0.0715	0.0628	0.0888	0.1523	0.0715	0.0628	0.0889	0.1523
1.8	0.0673	0.0635	0.0805	0.1447	0.0675	0.0635	0.0806	0.1448	0.0675	0.0635	0.0808	0.1448
2.0	0.0634	0.0637	0.0734	0.1380	0.0636	0.0638	0.0736	0.1380	0.0636	0.0638	0.0738	0.1380
2.5	0.0543	0.0627	0.0601	0.1237	0.0547	0.0628	0.0604	0.1238	0.0548	0.0628	0.0605	0.1239
3.0	0.0469	0.0607	0.0504	0.1123	0.0474	0.0609	0.0509	0.1124	0.0476	0.0609	0.0511	0.1125
5.0	0.0283	0.0515	0.0290	0.0833	0.0296	0.0519	0.0303	0.0837	0.0301	0.0521	0.0309	0.0839
7.0	0.0186	0.0435	0.0190	0.0663	0.0204	0.0442	0.0207	0.0671	0.0212	0.0445	0.0216	0.0674
10.0	0.0111	0.0349	0.0111	0.0509	0.0128	0.0359	0.0130	0.0520	0.0139	0.0364	0.0141	0.0526

表 9-39 圆形面积上均布荷载作用下中点的附加应力系数 α 与平均附加应力系数 $\bar{\alpha}$

z/r	圆形		z/r	圆形	
	α	$\bar{\alpha}$		α	$\bar{\alpha}$
0.0	1.000	1.000	2.6	0.187	0.560
0.1	0.999	1.000	2.7	0.175	0.546
0.2	0.992	0.998	2.8	0.165	0.532
0.3	0.976	0.993	2.9	0.155	0.519
0.4	0.949	0.986	3.0	0.146	0.507
0.5	0.911	0.974	3.1	0.138	0.495
0.6	0.864	0.960	3.2	0.130	0.484
0.7	0.811	0.942	3.3	0.124	0.473
0.8	0.756	0.923	3.4	0.117	0.463
0.9	0.701	0.901	3.5	0.111	0.453
1.0	0.647	0.878	3.6	0.106	0.443
1.1	0.595	0.855	3.7	0.101	0.434
1.2	0.547	0.831	3.8	0.096	0.425
1.3	0.502	0.808	3.9	0.091	0.417
1.4	0.461	0.784	4.0	0.087	0.409
1.5	0.424	0.762	4.1	0.083	0.401
1.6	0.390	0.739	4.2	0.079	0.393
1.7	0.360	0.718	4.3	0.076	0.386
1.8	0.332	0.697	4.4	0.073	0.379
1.9	0.307	0.677	4.5	0.070	0.372
2.0	0.285	0.658	4.6	0.067	0.365
2.1	0.264	0.640	4.7	0.064	0.359
2.2	0.245	0.623	4.8	0.062	0.353
2.3	0.229	0.606	4.9	0.059	0.347
2.4	0.210	0.590	5.0	0.057	0.341
2.5	0.200	0.574			

表 9-40　　圆形面积上三角形分布荷载作用下边点的附加应力系数 α 与平均附加应力系数 $\bar{\alpha}$



z/r	点 1		点 2		z/r	点 1		点 2		z/r	点 1		点 2	
	α	$\bar{\alpha}$	α	$\bar{\alpha}$		α	$\bar{\alpha}$	α	$\bar{\alpha}$		α	$\bar{\alpha}$	α	$\bar{\alpha}$
0.0	0.000	0.000	0.500	0.500	1.1	0.092	0.061	0.221	0.344	2.2	0.072	0.073	0.104	0.249
0.1	0.016	0.008	0.465	0.483	1.2	0.093	0.063	0.205	0.333	2.3	0.070	0.073	0.097	0.242
0.2	0.031	0.016	0.433	0466	1.3	0.092	0.065	0.190	0.323	2.4	0.067	0.073	0.091	0.236
0.3	0.044	0.023	0.403	0.450	1.4	0.091	0.067	0.177	0.313	2.5	0.064	0.072	0.086	0.230
0.4	0.054	0.030	0.376	0.435	1.5	0.089	0.069	0.165	0.303	2.6	0.062	0.072	0.081	0.225
0.5	0.063	0.035	0.349	0.420	1.6	0.087	0.070	0.154	0.294	2.7	0.059	0.071	0.078	0.219
0.6	0.071	0.041	0.324	0.406	1.7	0.085	0.071	0.144	0.286	2.8	0.057	0.071	0.074	0.214
0.7	0.078	0.045	0.300	0.393	1.8	0.083	0.072	0.134	0.278	2.9	0.055	0.070	0.070	0.209
0.8	0.083	0.050	0.279	0.380	1.9	0.080	0.072	0.126	0.270	3.0	0.052	0.070	0.067	0.204
0.9	0.088	0.054	0.258	0.368	2.0	0.078	0.073	0.117	0.263	3.1	0.050	0.059	0.064	0.200
1.0	0.091	0.057	0.238	0.356	2.1	0.075	0.073	0.110	0.255	3.2	0.048	0.069	0.061	0.196
3.3	0.046	0.068	0.059	0.192	3.8	0.038	0.065	0.046	0.173	4.6	0.029	0.059	0.031	0.150
3.4	0.045	0.067	0.055	0.188	3.9	0.037	0.064	0.043	0.170	4.8	0.027	0.058	0.029	0.145
3.5	0.043	0.067	0.053	0.184	4.0	0.036	0.063	0.041	0.167	5.0	0.025	0.057	0.027	0.140
3.6	0.041	0.066	0.051	0.180	4.2	0.033	0.062	0.038	0.161					
3.7	0.040	0.065	0.048	0.177	4.4	0.031	0.061	0.034	0.155					

第三节　基础倾覆稳定计算

本节给出的倾覆稳定计算方法，适用于基础埋深 h_t 与实际宽度或直径 b_0 之比不小于 3 的电杆基础，以及窄基铁塔的单独基础、联合基础、独立基础等的倾覆稳定计算。基础型式如图 9-19 所示。

图 9-19 中，S_0、γ_f、H_0、h_t、b_0 含义同式（9-52）～式（9-56）。

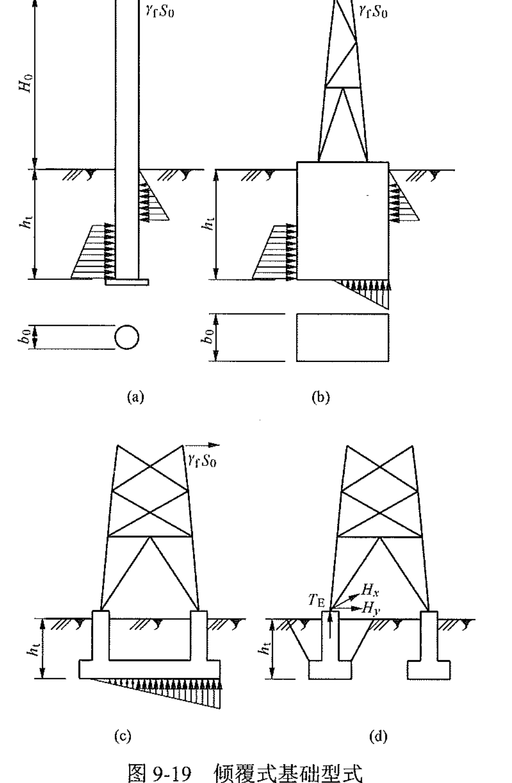


图 9-19　倾覆式基础型式

（a）电杆基础；（b）窄基铁塔单独基础；（c）联合基础；（d）独立基础

一、电杆基础

电杆基础分为有卡盘和无卡盘两种基础型式，当电杆倾覆力较小时采用无卡盘基础型式，当电杆倾覆力较大时，则采用加上卡盘或加上、下卡盘的基础型式。

（一）倾覆稳定计算简图及假定（图 9-20）

（1）电杆基础在达到极限倾覆力 S_j 或极限倾覆力矩 M_j 时，假定基础侧向土达到了极限平衡状态，此时电杆基础依靠侧面的被动土压力维持平衡。

（2）假定被动土压力的分布为沿深度线性变化，如图 9-20 所示。任一深度 y 处的被动土压力可按下式计算

$$\left.\begin{aligned} P_x &= my \\ m &= \gamma_s \tan^2\left(45^\circ+\frac{\beta}{2}\right) \end{aligned}\right\} \qquad (9\text{-}51)$$

式中 P_x——被动土压力，kPa；

m——土压力参数，kN/m³；

γ_s——土的计算重度，kN/m³，按表 9-41 确定；

β——等代内摩擦角，(°)，按表 9-41 确定；

y——自设计地面起算的深度，m。

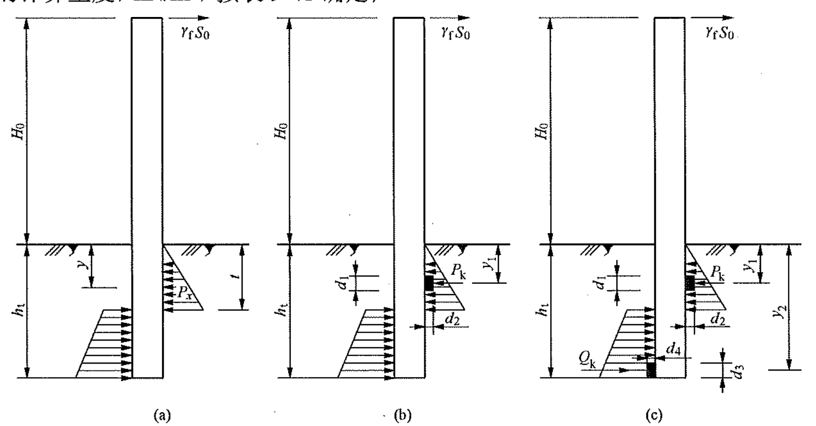


图 9-20 电杆基础倾覆稳定计算简图

(a) 无卡盘电杆；(b) 带上卡盘电杆；(c) 带上下卡盘电杆

表 9-41 土 压 力 参 数

参数	坚硬、硬塑的黏土、粉质黏土；密实的粉土	可塑黏土、粉质黏土；中密的粉土	软塑黏土、粉质黏土；稍密的粉土	粗砂、中砂	细砂、粉砂
γ_s (kN/m³)	17	16	15	17	15
β (°)	35	30	15	35	30
m (kN/m³)	62.7	48.0	25.5	62.7	45.0

注 本表不包括松散状态的砂土和粉土。

(3) 在倾覆力作用下电杆的计算宽度按下列方法确定。

1) 基础为单杆组成时应按式 (9-52) 确定

$$b_0 = bK_0 \tag{9-52}$$

$$K_0 = 1 + \frac{2h_t}{3b}\xi\cos\left(45° + \frac{\beta}{2}\right)\tan\beta \tag{9-53}$$

式中 b_0——电杆的计算宽度，m；

b——电杆的实际宽度，m；

K_0——空间增大系数，可按式 (9-53) 进行计算或按表 9-42 确定；

ξ——土的侧压力系数，可按表 9-42 确定。

表 9-42 空间增大系数 K_0 和侧压力系数 ξ

土体类型		黏土、粉质黏土、粉土		粉、细砂	黏土	粉质黏土、粉土	粗、中砂
等代内摩擦角β (°)		15	30	30	35	35	35
侧压力系数ξ		0.6	0.6	0.38	0.72	0.6	0.38
h_t/b	11	1.72	2.27	1.80	2.71	2.42	1.90
	10	1.65	2.15	1.73	2.55	2.29	1.82
	9	1.59	2.04	1.66	2.40	2.16	1.74
	8	1.52	1.92	1.59	2.24	2.03	1.66
	7	1.46	1.81	1.51	2.09	1.91	1.57
	6	1.39	1.69	1.44	1.93	1.78	1.49
	5	1.33	1.58	1.37	1.78	1.65	1.41
	4	1.26	1.46	1.29	1.62	1.52	1.33
	3	1.20	1.35	1.22	1.47	1.39	1.25
	2	1.13	1.23	1.15	1.31	1.26	1.16
	1	1.07	1.12	1.07	1.16	1.13	1.08
	0.8	1.05	1.09	1.06	1.12	1.10	1.07
	0.6	1.04	1.07	1.04	1.09	1.08	1.05

2）基础为双杆组成（见图 9-21），当双杆中心距 $L \leqslant 2.5b$ 时，基础计算宽度按式（9-54）与式（9-55）中的较小者确定。ρ 为上部结构水平力作用方向与双杆基础水平对称轴的夹角。

$$b_0 = (b + L\cos\rho)K_0 \tag{9-54}$$

$$b_0 = 2bK_0 \tag{9-55}$$

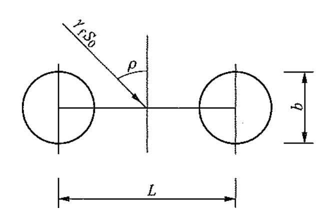


图 9-21 双杆基础计算宽度示意图

（二）无卡盘电杆基础倾覆稳定计算

如图 9-20（a）所示，当无卡盘电杆基础的埋深和尺寸确定后，极限倾覆力 S_j 和极限倾覆力矩 M_j 应符合下列公式要求：

$$\left.\begin{aligned} S_j &= \frac{mb_0h_t^2}{\eta\mu} \geqslant \gamma_f S_0 \\ M_j &= \frac{mb_0h_t^3}{\mu} \geqslant \gamma_f H_0 S_0 \end{aligned}\right\} \tag{9-56}$$

$$\eta = \frac{H_0}{h_t} \tag{9-57}$$

$$\mu = \frac{3}{1-2\theta^3} \tag{9-58}$$

$$\theta = \frac{t}{h_t} \tag{9-59}$$

式中 S_j——电杆的极限倾覆力，kN；

S_0——作用于电杆上的倾覆力设计值，kN；

M_j——电杆的极限倾覆力矩，kN·m；

H_0——倾覆力 S_0 的作用点至设计地面处的距离，m；

h_t——基础埋深，m；

t——其含义如图 9-20（a）所示，m，一般不求解 t，而是直接求解 θ。

θ 可求解一元三次方程 $\theta^3 + \frac{3}{2}\theta^2\eta - \frac{3}{4}\eta - \frac{1}{2} = 0$ 得到，或按表 9-43 取值。

表 9-43 θ 及 μ 值

η	θ	μ	$\eta\mu$	η	θ	μ	$\eta\mu$
0.10	0.784	86.7	8.7	5.00	0.719	11.7	58.5
0.25	0.774	40.6	10.1	6.00	0.717	11.5	68.8
0.50	0.761	25.3	12.6	7.00	0.716	11.3	79.0
1.00	0.746	17.7	17.7	8.00	0.715	11.2	89.2
2.00	0.732	13.9	27.9	9.00	0.714	11.1	99.5
3.00	0.725	12.7	38.1	10.00	0.714	11.0	109.7
4.00	0.722	12.1	48.3				

（三）带上卡盘的电杆基础倾覆稳定计算

当电杆基础的极限倾覆力 S_j 和极限倾覆力矩 M_j 不满足式（9-56）的要求时，应采取措施增强电杆的抗倾覆承载能力。一般方法是在基础埋深的 1/3 处加设上卡盘，必要时增设下卡盘。当地基土为冻胀土时应不设卡盘（可加大电杆埋深）或采取防冻胀措施。计算简图如图 9-20（b）和（c）所示。

计算带上卡盘的电杆基础时，当埋深及上卡盘位置确定后，应按式（9-60）计算卡盘横向压力，按式（9-61）、式（9-62）确定卡盘长度。

$$P_k = \gamma_f S_0 - mb_0h_t^2\left(\theta^2 - \frac{1}{2}\right) \tag{9-60}$$

$$L_1 = \frac{P_k}{y_1(md_1 + 2\gamma_s d_2 \tan\beta)} \tag{9-61}$$

$$L_u = L_1 + b \tag{9-62}$$

式中 P_k——卡盘横向压力设计值，kN；

y_1——设计地面至上卡盘的距离，m；

d_1——上卡盘厚度，m；

d_2——上卡盘宽度，m；

L_1——上卡盘计算长度，m；

b——卡盘处的电杆宽度或直径，m；

L_u——上卡盘全长，m。

式（9-60）中的 θ 可按下式求解：

$$2\theta^3 - \frac{3y_1}{h}\theta^2 + \frac{3y_1}{2h} - 1 + \frac{3\gamma_f S_0}{mbh^2}\left(\frac{y_1}{h} + \eta\right) = 0 \tag{9-63}$$

当 $y_1 = \frac{h_t}{3}$ 时，θ 可按下式求解或按表 9-44 取值。

$$\frac{\gamma_f S_0}{mbh^2}(1+3\eta) = \frac{1}{2} + \theta^2 - 2\theta^3 = F_1 \tag{9-64}$$

表 9-44 F_1 和 θ 值

θ	F_1	θ	F_1	θ	F_1	θ	F_1
0.600	0.428	0.660	0.360	0.714	0.282	0.740	0.237
0.610	0.418	0.670	0.347	0.716	0.279	0.750	0.219
0.620	0.408	0.680	0.334	0.718	0.275	0.760	0.200
0.630	0.397	0.690	0.319	0.720	0.272	0.770	0.180
0.640	0.385	0.707	0.293	0.725	0.263	0.780	0.159
0.650	0.373	0.712	0.285	0.730	0.255		

（四）带上、下卡盘的电杆基础倾覆稳定计算

计算带上、下卡盘的电杆基础时，当基础埋深及上、下卡盘位置确定后，应按式（9-65）、式（9-66）计算上、下卡盘的横向压力设计值，按式（9-61）、式(9-67)确定卡盘的计算长度，按式(9-62)、式(9-68)确定上、下卡盘的实际长度。

$$P_k=\frac{(\gamma_f S_0-S_j)(H_0+y_2)}{y_2-y_1} \quad (9\text{-}65)$$

$$Q_k=\frac{(\gamma_f S_0-S_j)(H_0+y_1)}{y_2-y_1} \quad (9\text{-}66)$$

$$L_2=\frac{Q_k}{y_2(md_3+2\gamma_s d_4\tan\beta)} \quad (9\text{-}67)$$

$$L_d=L_2+b \quad (9\text{-}68)$$

式中 Q_k——下卡盘横向压力设计值，kN；

y_2——设计地面至下卡盘的距离，m；

d_3——下卡盘厚度，m；

d_4——下卡盘宽度，m；

L_2——下卡盘计算长度，m；

L_d——下卡盘全长，m。

二、窄基铁塔基础

窄基铁塔基础一般为整体式刚性基础，可分为有一个台阶和无台阶两种基础型式。

（一）倾覆稳定计算简图

窄基铁塔基础倾覆稳定计算时考虑基础侧面土的被动土压力作用，为了简化计算，假定基侧土的被动土压力沿埋深呈直线变化。根据基础埋深与侧面宽度之比的不同考虑不同的基础侧面被动土压力分布，可划分为浅基础和深基础，当该值小于等于 3 且大于 1.5 时为浅基础，计算简图为 9-22（a）、（b）；当该值大于 3 时为深基础，计算简图为 9-22（c）、（d）。

图 9-22 中 c 为基底压力的分布长度，m，其余符号的含义与式（9-69）～式（9-91）相同。

窄基铁塔浅基础的基坑回填土应满足分层夯实的要求，即每回填 300mm 夯实为 200mm。

（二）无台阶浅基础倾覆稳定计算

如图 9-22（a）所示，当基础的埋深和断面尺寸确定后，其倾覆稳定计算应符合下列公式要求。

$$\gamma_f H_0 S_0 \leqslant \frac{1}{2}Ef_\beta b_1-\frac{2}{3}Eh_t+y\left(e+f_\beta h_t\right) \quad (9\text{-}69)$$

$$y=\frac{F+G_0-\gamma_f S_0 f_\beta}{1+f_\beta^2}\leqslant 0.8b_1b_0f_a，\ 且\ y>0 \quad (9\text{-}70)$$

$$E=\frac{1}{2}mb_0h_t^2 \quad (9\text{-}71)$$

$$e\leqslant\frac{1}{3}b_1 \quad (9\text{-}72)$$

$$b_0=bK_0 \quad (9\text{-}73)$$

$$f_\beta=\tan\beta \quad (9\text{-}74)$$

式中 S_0——上部结构水平作用力设计值，kN；

f_β——地基土与基础面的摩擦系数；

y——基底反力，kN；

e——基底反力 y 的偏心距，m；

G_0——基础自重，kN；

F——上部结构传来的垂直荷载，kN；

b_1——主柱正面宽度，m；

b——主柱侧面宽度，m；

b_0——主柱侧面的计算宽度，m；

f_a——修正后的地基承载力特征值，kPa。

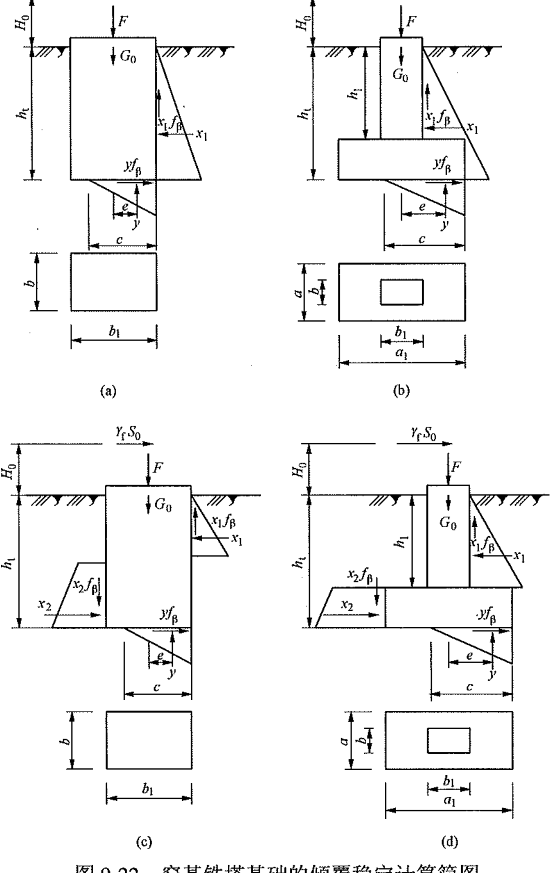


图 9-22 窄基铁塔基础的倾覆稳定计算简图
（a）无台阶浅基础；（b）有台阶浅基础；
（c）无台阶深基础；（d）有台阶深基础

（三）有台阶浅基础倾覆稳定计算

如图 9-22（b）所示，当基础的埋深和断面尺寸确定后，其倾覆稳定计算应符合下列公式要求。

$$\gamma_f H_0 S_0 \leqslant \frac{1}{2}Ef_\beta\left[a_1-\theta^2\left(a_1-b_1\frac{b_0}{a_0}\right)\right]-\frac{2}{3}Eh_t\left(1-\theta^3+\frac{b_0}{a_0}\theta^3\right)+y\left(e+f_\beta h_t\right) \quad (9\text{-}75)$$

$$y=\frac{F+G-\gamma_f S_0 f_\beta}{1+f_\beta^2}\leqslant 0.8a_1 a_0 f_a\text{，且 }y>0 \tag{9-76}$$

$$E=\frac{1}{2}ma_0 h_t^2 \tag{9-77}$$

$$a_0=\frac{h_t^2 K_0-h_1^2 K_0'}{h_t^2-h_1^2}a \tag{9-78}$$

$$\theta=\frac{h_1}{h_t} \tag{9-79}$$

$$e\leqslant\frac{1}{3}a_1 \tag{9-80}$$

式中　G——基础自重和基础上的土即台阶正上方土重之和，kN；

a——底板侧面宽度，m；

a_0——底板侧面的计算宽度，m；

h_1——基柱的埋深，m；

K_0、K_0'——分别以 h_t/a 和 h_1/a 为深宽比确定的宽度增大系数，可按式（9-53）计算或表 9-42 取值。

（四）无台阶深基础倾覆稳定计算

如图 9-22（c）所示，当基础的埋深和断面尺寸确定后，其倾覆稳定计算应符合下列公式要求：

$$\gamma_f H_0 S_0\leqslant\frac{1}{2}Ef_\beta b_1+\frac{2}{3}Eh_t\left(1-2\theta^3\right)+y\left(e+f_\beta h_t\right) \tag{9-81}$$

$$\theta^2=\frac{\gamma_f S_0+\left(F+G_0\right)f_\beta}{2E\left(1+f_\beta^2\right)}+\frac{1}{2}<1 \tag{9-82}$$

$$y=\frac{F+G_0-\gamma_f S_0 f_\beta}{1+f_\beta^2}\leqslant 0.8b_1 b_0 f_a\text{，且 }y>0 \tag{9-83}$$

$$E=\frac{1}{2}mb_0 h_t^2 \tag{9-84}$$

$$e\leqslant\frac{1}{3}b_1 \tag{9-85}$$

（五）有台阶深基础倾覆稳定计算

如图 9-22（d）所示，当基础的埋深和断面尺寸确定后，其倾覆稳定计算应符合下列公式要求。

$$\gamma_f S_0 H_0\leqslant\frac{f_\beta}{2b_0}E\left[\left(1-\theta^2\right)a_0 a_1+\theta^2 b_0 b_1\right]+\frac{2h_t}{3b_0}E\left[a_0-\theta^3\left(a_0+b_0\right)\right]+y\left(e+f_\beta h_t\right) \tag{9-86}$$

$$y=\frac{F+G-\gamma_f S_0 f_\beta}{1+f_\beta^2}\leqslant 0.8a_1 a_0 f_a\text{，且 }y>0 \tag{9-87}$$

$$E=\frac{1}{2}mb_0 h_t^2 \tag{9-88}$$

$$a_0=\frac{h_t^2 K_0-h_1^2 K_0'}{h_t^2-h_1^2}a \tag{9-89}$$

$$\theta=\frac{h_1}{h_t} \tag{9-90}$$

$$e\leqslant\frac{1}{3}a_1 \tag{9-91}$$

三、联合基础

联合基础就是把铁塔四个基础主柱用一个底板连成整体的筏板基础，可分为平板式和梁板式两种类型，架空输电线路基础设计中常常采用梁板式筏板基础，其柱网接近方形，沿柱网轴线方向设置连梁。其特点是底板面积大，这样就减轻了对地基的压力。因此，它适用于荷重较大而地基承载力较差的塔位。另一特点是它可以浅埋，当地下水位较高时，施工排水较容易解决。

（一）倾覆稳定计算简图

联合基础相对埋深较浅，在倾覆力作用下一般不考虑基础侧向土压力的作用。其倾覆稳定可忽略地基反力的影响，由基础（含上部垂直力）和底板正上方土的重力对底板边缘的力矩维持平衡。计算简图见图 9-23。

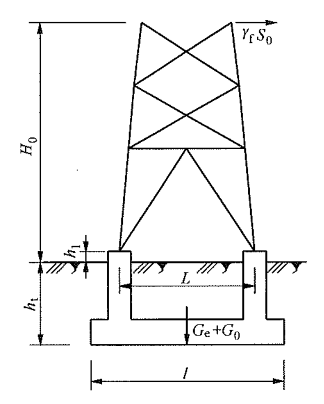


图 9-23　联合基础倾覆计算简图

图 9-23 中 G_e 为基础底面正上方土的重力，kN。

（二）倾覆稳定计算

当联合基础的埋深和底板尺寸确定后，其极限倾覆力矩 M_j 应符合下式要求（在双向倾覆力矩作用时可分别进行计算）

$$M_j=\frac{\left(G_e+G_0\right)l}{2}\geqslant\left(H_0+h_t\right)\gamma_f S_0 \tag{9-92}$$

式中　G_e——基础底面正上方土的重力，kN；

l——平行于倾覆力 S_0 方向的底板长度，m。

当基础作用力按四个塔腿分别给出时，其极限倾覆力矩 M_j 可按下式计算

$$M_j=\frac{(G_e+G_0)l}{2}\geqslant\gamma_f\frac{\sum T(l+L)+2\sum S(h_t+h_1)-\sum N(l-L)}{2}$$

（9-93）

式中 T、N——分别为作用于基柱顶面的设计上拔力和下压力，kN；

L——平行于倾覆力 S_0 方向基柱间的距离，m；

S——作用于基柱顶面处的平行于倾覆力 S_0 方向的水平力设计值，kN；

h_1——基柱地面以上部分的高度，m；

l——平行于倾覆力 S_0 方向基础底板的长度，m。

（三）内力计算

当地基比较均匀、联合基础的结构整体刚度足够大时，可不考虑整体挠曲变形仅考虑局部弯曲作用，将联合基础的筏板按倒置楼盖法进行内力分析。

一般情况下，联合基础（见图 9-24）的板与梁浇成整体，梁高不小于 2 倍的板厚，梁的宽高比约取 1/2～1/2.5，板的柱形刚度 $\frac{E\delta^3}{12(1-\mu^2)}$ 与梁的抗扭刚度 GI_T 之比小于 1.0。其中为 E 弹性模量，δ 为板厚，μ 为泊松比，G 为剪切模量，I_T 为截面抗扭惯性矩。

按倒置楼盖法进行梁板式筏基内力分析时，其底板和基础梁可分别按弹性双向板和连续梁进行分析，跨中弯矩以及内支座的弯矩值宜乘以 1.2 的系数，考虑整体弯曲的影响，梁板式筏基的底板和基础梁的配筋除满足计算要求外，纵横方向的支座钢筋尚应有 1/2～1/3 贯通全跨，且其配筋率不应小于 0.15%；跨中钢筋应按实际配筋全部连通。

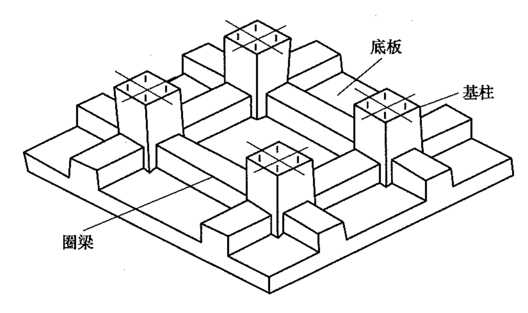


图 9-24　联合基础外形图

（1）底板的弯矩计算（取截面上边缘受拉为正号）。联合基础的底板尺寸既宽又厚，当符合本章第五节基础的构造要求时，其剪切强度可不必计算。

1）底板弯矩计算假设及简图。底板弯矩计算时，假设基底应力由三项应力综合组成，应力均按直线变化，如图 9-25 所示。

① σ_0 略去基础和其上土重的基底正压应力，其应力图形假设为矩形，按下式计算

$$\sigma_0=\frac{N_0}{bl} \tag{9-94}$$

式中 σ_0——轴心荷载作用下基底的压力，kN/m²；

N_0——轴心荷载设计值，kN，不考虑基础底板和其上土重。

② σ_x、σ_y 双向弯矩作用下的基底应力，其应力图形假设为反对称的三角形，支撑边界处的值可按下式计算

$$\sigma_{x(\max)}=\pm\frac{6M_x}{bl^2} \tag{9-95}$$

$$\sigma_{y(\max)}=\pm\frac{6M_y}{lb^2} \tag{9-96}$$

式中 M_x、M_y——作用于基础底面 X 轴、Y 轴的力矩，kN·m；

$\sigma_{x(\max)}$、$\sigma_{y(\max)}$——分别为 X 和 Y 方向支撑边界处由 M_x、M_y 产生的基底应力，kN/m²。

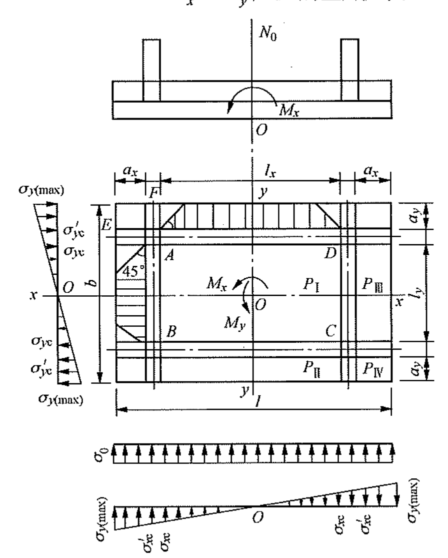


图 9-25　联合基础底板弯矩计算简图

2）$P_Ⅰ$ 部分板的弯矩计算。$P_Ⅰ$ 部分板按四边固定，以弹性理论计算跨中和固定边的弯矩。计算跨中弯矩时，取钢筋混凝土板的泊松比 $\mu=\frac{1}{6}$；$\frac{l_y}{l_x}=1.0\sim0.5$，中间值可近似地按直线插入法确定。$P_Ⅰ$ 板计算简图如图 9-26 所示。

跨中单位宽度上的弯矩 M_{0x}（平行 x 轴）、M_{0y}（平行 y 轴）可按下式计算：

$$\left.\begin{aligned}M_{0x}&=\eta_{0x}\sigma_0l_y^2\\M_{0y}&=\eta_{0y}\sigma_0l_y^2\end{aligned}\right\} \tag{9-97}$$

固定边单位宽度上的弯矩 M_x^0（平行 x 轴）、M_y^0（平行 y 轴）可按下式计算：

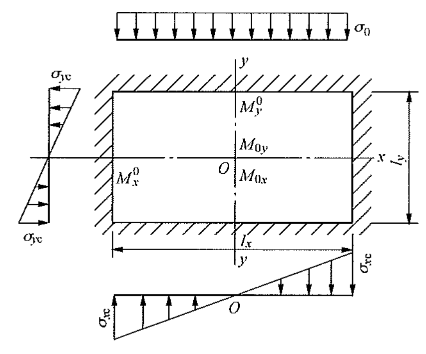


图 9-26 $P_{\rm I}$板荷载计算图

$$\left.\begin{aligned} M_x^0 &= -\left(\eta_x^0\sigma_0 \pm \eta_x\sigma_{xc}\right)l_y^2 \\ M_y^0 &= -\left(\eta_y^0\sigma_0 \pm \eta_y\sigma_{yc}\right)l_y^2 \end{aligned}\right\} \tag{9-98}$$

式中 M_{0x}、M_{0y}——分别为 l_x 和 l_y 方向板中心点单位宽度的弯矩，kN·m/m；

M_x^0、M_y^0——固定边中点沿 l_x 和 l_y 方向单位宽度的弯矩，kN·m/m；

η_{0x}、η_{0y}——轴心荷载作用下计算跨中 X 和 Y 方向的弯矩系数，可按表 9-45 取值；

η_x^0、η_y^0——轴心荷载作用下计算固定边 X 和 Y 方向的弯矩系数，可按表 9-45 取值；

η_x、η_y——弯矩荷载作用下计算固定边 X 和 Y 方向的弯矩系数，可按表 9-45 取值；

l_x、l_y——$P_{\rm I}$板在 X 轴和 Y 轴方向的净跨度，m。

表 9-45 计算弯矩系数

l_x/l_y	轴心荷载				弯矩荷载	
	跨中		固定边		固定边	
	η_{0x}	η_{0y}	η_x^0	η_y^0	η_x	η_y
1	0.0205	0.0205	0.0513	0.0513	0.0155	0.0155
0.9	0.0202	0.0249	0.0541	0.0588	0.0184	0.0160
0.8	0.0189	0.0295	0.0559	0.0664	0.0218	0.0164
0.7	0.0167	0.0340	0.0569	0.0735	0.0257	0.0166
0.6	0.0137	0.0380	0.0571	0.0793	0.0301	0.0167
0.5	0.0105	0.0406	0.0570	0.0829	0.0346	0.0167

3）$P_{\rm II}$、$P_{\rm III}$部分板的弯矩计算。$P_{\rm II}$、$P_{\rm III}$部分板的长宽比 $a\geqslant 2$ 时，可按单向受弯构件计算，即按单位宽度的悬臂板计算。当长宽比 $a<2.0$ 时，可按图 9-25 中的阴影面积的反力，取跨度为 l_x、l_y 的双向悬臂板计算。一般长宽比 $a\geqslant 2$ 的板可按下式计算其单位长宽的弯矩：

$$\left.\begin{aligned} M_{\rm PII} &= -\left[2\sigma_0 \pm \sigma_{\rm y(max)} \pm \sigma'_{\rm yc}\right]a_{\rm y}^2/4 \\ M_{\rm PIII} &= -\left[2\sigma_0 \pm \sigma_{\rm x(max)} \pm \sigma'_{\rm xc}\right]a_{\rm x}^2/4 \end{aligned}\right\} \tag{9-99}$$

式中 σ'_{xc}、σ'_{yc}——分别为 X 和 Y 方向固定边外侧的基数压力值，kN/m²。

4）$P_{\rm IV}$部分板的弯矩计算。$P_{\rm IV}$部分板的弯矩一般不起控制作用，可不予计算，其配筋可按 $P_{\rm II}$板或构造要求统一考虑。

（2）梁的内力计算。剪力以对邻近断面产生的力矩沿顺时针方向为正号；弯矩以截面上边缘受拉为正号。

1）荷载分配（图 9-27）：AD（BC）梁分担 $P_{\rm I}$板的近似于梯形和 $P_{\rm II}$板的矩形两部分（BC 梁的阴影部分）反力，AB（DC）梁分担 $P_{\rm I}$板的近似于三角形和 $P_{\rm III}$板的矩形两部分（AB 梁的阴影部分）反力。

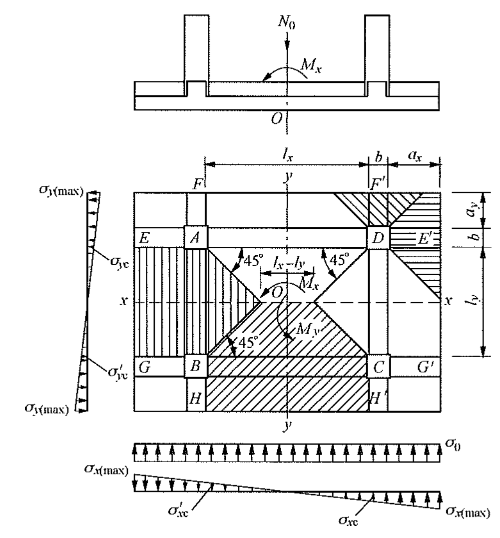


图 9-27 梁的荷载分配图

2）AD（BC）梁的内力：在轴心荷载 N_0 和弯矩 M_y 作用下，由 $P_{\rm II}$板分配的荷载 q_1（kN/m）产生的弯矩和剪力可按下式计算

$$Q_{\rm D1}=-Q_{\rm A1}=q_1l_x/2 \tag{9-100}$$

$$M_{\rm A1}=M_{\rm D1}=-q_1l_x^2/12 \tag{9-101}$$

$$M_{01}=q_1l_x^2/24 \tag{9-102}$$

式中 l_x——梁 AD 的净跨度，m。

在轴心荷载 N_0 和弯矩 M_y 作用下，由 $P_{\rm I}$板分配的梯形部分荷载 q_2，kN/m 产生的弯矩和剪力可按下式计算

$$Q_{\rm D2}=-Q_{\rm A2}=q_2(l_x-l_y/2)/2 \tag{9-103}$$

$$M_{\rm A2}=M_{\rm D2}=-q_2\left(l_x^2-\frac{l_y}{2}+\frac{l_y^3}{8l_x}\right)/12 \tag{9-104}$$

$$M_{02}=q_2\left(l_x^2-\frac{l_y^3}{4l_x}\right)/24 \tag{9-105}$$

式中 l_y——梁 AB 的净跨度，m。

式（9-100）～式（9-105）中 q_1 和 q_2 分别为

$$q_1=\frac{1}{2}\left(b-l_y\right)\left(\sigma_0\pm\frac{\sigma_{y(\max)}+\sigma_{yc}}{2}\right) \tag{9-106}$$

$$q_2=\frac{1}{2}l_y\left(\sigma_0\pm\frac{\sigma_{yc}}{2}\right) \tag{9-107}$$

如图 9-27 所示，当计算 AD 梁时，q_1、q_2 式中右侧括号内第二项取正号；计算 BC 梁时，取负号。

在 M_x 作用下由 $P_{Ⅱ}$ 板分配的荷载 q_3 产生的弯矩和剪力可按下式计算

$$Q_{D3}=Q_{A3}=-q_3l_x/5 \tag{9-108}$$

$$M_{A3}=-M_{D3}=-q_3l_x^2/60 \tag{9-109}$$

$$M_{03}=0 \tag{9-110}$$

在 M_x 作用下由 $P_Ⅰ$ 板分配的近似于梯形部分荷载 q_4 产生的弯矩和剪力可按下式计算

$$Q_{D4}=Q_{A4}=-q_4l_x/b \tag{9-111}$$

$$M_{A4}=-M_{D4}=-q_4l_x^2/50 \tag{9-112}$$

$$M_{04}=0 \tag{9-113}$$

式中：q_3、q_4 是在 M_x 作用下分别为 $P_{Ⅱ}$ 和 $P_Ⅰ$ 板分配的荷载，kN/m，其计算为

$$q_3=\frac{1}{2}\sigma_{xc}\left(b-l_y\right) \tag{9-114}$$

$$q_4=\sigma_{xc}\frac{\left(l_x-l_y/2\right)l_y}{4l_x} \tag{9-115}$$

其他符号含义同式（9-100）～式（9-105）。

将求得相对应截面的弯矩和剪力进行代数叠加，即为 AD 梁相对应截面的总弯矩 $\sum M_{AD}$、$\sum M_{DA}$、$\sum M_{OD}$ 和剪力 $\sum Q_{AD}$、$\sum Q_{DA}$。

3）AB（CD）梁的内力：在轴心荷载 N_0 和弯矩 M_x 作用下，由 $P_{Ⅱ}$ 板分配的荷载 q_1' 产生的弯矩和剪力按下式计算

$$Q_{B1}'=-Q_{A1}'=q_1'l_y/2 \tag{9-116}$$

$$M_{A1}'=M_{B1}'=-q_1'l_y^2/12 \tag{9-117}$$

$$M_{01}'=q_1'l_y^2/24 \tag{9-118}$$

在 N_0 和 M_x 作用下由 $P_Ⅰ$ 板分配的近似于三角形部分荷载 q_2' 产生的弯矩和剪力按下式计算：

$$Q_{B2}'=-Q_{A2}'=q_2'l_y/4 \tag{9-119}$$

$$M_{A2}'=M_{B2}'=-5q_2'l_y^2/96 \tag{9-120}$$

$$M_{02}'=q_2'l_y^2/32 \tag{9-121}$$

式中，q_1'、q_2' 是在 N_0 和 M_x 作用下分别为 $P_{Ⅱ}$ 板和 $P_Ⅰ$ 板分配的荷载，kN/m，其计算为

$$q_1'=\frac{1}{2}\left(l-l_x\right)\left[\sigma_0\pm\frac{\sigma_{x(\max)}+\sigma_{xc}}{2}\right] \tag{9-122}$$

$$q_2'=\frac{1}{2}l_y\left[\sigma_0\pm\frac{\sigma_{xc}}{2}\left(2-\frac{l_y}{l_x}\right)\right] \tag{9-123}$$

如图 9-27 所示，计算 AB 梁时，q_1'、q_2' 式中右侧括号内第二项取正号；计算 DC 梁时，取负号。

在 M_y 作用下由 $P_{Ⅱ}$ 板分配的荷载 q_3' 产生的弯矩和剪力按下式计算

$$Q_{B3}'=Q_{A3}'=-q_3'l_y/5 \tag{9-124}$$

$$M_{A3}'=-M_{B3}'=-q_3'l_y^2/60 \tag{9-125}$$

$$M_{03}'=0 \tag{9-126}$$

在 M_y 作用下由 $P_Ⅰ$ 板分配的三角形部分荷载 q_4' 产生的弯矩和剪力按下式计算

$$Q_{B4}'=Q_{A4}'=-q_4'l_y/6 \tag{9-127}$$

$$M_{A4}'=-M_{B4}'=-q_4'l_y^2/50 \tag{9-128}$$

$$M_{04}'=0 \tag{9-129}$$

以上六式中 q_3'、q_4' 是在 M_y 作用下分别为 $P_{Ⅱ}$ 板和 $P_Ⅰ$ 板分配的荷载，kN/m，其计算为

$$q_3'=\frac{1}{2}\sigma_{yc}\left(l-l_x\right) \tag{9-130}$$

$$q_4'=\frac{1}{8}\sigma_{yc}l_y \tag{9-131}$$

其他符号含义同式（9-100）～式（9-105）。

将求得的相对应截面的 M' 和 Q' 进行代数叠加，即得相对应截面的总弯矩 $\sum M_{AB}$、$\sum M_{BA}$、$\sum M_{OB}$ 和剪力 $\sum Q_{AB}$、$\sum Q_{BA}$。

4）AE 梁的内力：在轴心荷载 N_0 和弯矩 M_x 作用下，由 $P_{Ⅲ}$ 板分配的荷载 F_1，梁下板分配的荷载 F_2 和 $P_{Ⅳ}$ 板分配的荷载 F_3、F_4 等，产生的剪力 Q_A 和弯矩 M_A 可按下式计算：

$$Q_A=-\left(F_1+F_2+F_3+F_4\right) \tag{9-132}$$

$$\left.\begin{aligned}M_A&=-\left[\frac{2F_1a_x}{3}+\frac{F_2a_x}{2}+\frac{F_3\left(a_x+a_y\right)}{2}+\frac{2F_4a_y}{3}\right]\\F_1&=\left(\sigma_p+\sigma_{y1}\right)a_x^2/2\\F_2&=\left(\sigma_p+\sigma_{y2}\right)a_xb'\\F_3&=\left(\sigma_p+\sigma_{y3}\right)\left(a_x-a_y\right)a_y/2\\F_4&=\left(\sigma_p+\sigma_{y3}\right)a_y^2/2\end{aligned}\right\} \tag{9-133}$$

式中 F_1——$P_{Ⅲ}$ 板分配给 AE 梁的荷载，kN；

F_2——梁下板分配的荷载，kN；

F_3、F_4——$P_{Ⅳ}$ 板分配给 AE 梁的荷载，kN；

a_x、a_y——分别为板在 X 轴和 Y 轴方向的外伸长度，m。

σ_p、$\sigma_{y1}\sim\sigma_{y3}$ 均为计算传递给梁的荷载时的相应板底的应力计算值，kN/m²，分别按如下公式计算：

$$\sigma_p=\sigma_0+\sigma_{x(\max)}(l-a_x)/l;$$

$$\sigma_{y1}=\sigma_{y(\max)}\left(1-\frac{a_x+2a_y+2b}{b}\right)$$，当 σ_{y1} 为负值时取 $\sigma_{y1}=0$；

$$\sigma_{y2}=\sigma_{y(\max)}\left(1-\frac{2a_y+b'}{b}\right);$$

$$\sigma_{y3}=\sigma_{y(\max)}\left(1-\frac{a_y}{b}\right)$$

5）AF 梁的内力。

$$Q'_A=-(2F'_1+F'_2) \quad (9\text{-}134)$$

$$\left.\begin{aligned}M'_A&=-(4F'_1a_y/3+F'_2a_y/2)\\ F'_1&=(\sigma'_p+\sigma_{y3})a_y^2/2\end{aligned}\right\} \quad (9\text{-}135)$$

$F'_2=(\sigma'_p+\sigma_{y2})a_yb'$，其中 $\sigma'_p=\sigma_0+\sigma_{x(\max)}(l_x+b')/l$

式中 F'_1——PⅡ板或PⅣ板分配给 AF 梁的荷载，kN；

F'_2——梁下板分配的荷载，kN。

6）DE' 梁的内力。

$Q_{DE'}$ 和 $M_{DE'}$ 均可按式（9-132）和式（9-133）计算，但 $F_1\sim F_4$ 式中的 $\sigma_p=\sigma_0-\sigma_{x(\max)}\ (l-a_x)/l$。

7）DF' 梁的内力。

Q_{DF}和 M_{DF}均可按式（9-134）和式（9-135）计算，但式中 F'_1、F'_2 式中的 $\sigma_{x(\max)}$、σ_{y2}、σ_0、σ_{y3} 均以负值代入。

四、独立基础

独立基础是最常见的基础型式，如图 9-19（d）所示。独立基础受力为塔腿传递到各腿基础柱顶的上拔力、下压力和水平力；对于窄基铁塔单独基础、联合基础，其受力则主要为杆塔传递到基础上的倾覆力矩、下压力及水平力。

本节讨论的独立基础为大开挖类基础。因为独立基础柱顶不承受倾覆力矩的作用，其基础尺寸主要由上拔稳定和下压稳定控制，所以一般不需要考虑下压、上拔时的倾覆稳定问题，但是当基础主柱露出设计地面较高时，应进行倾覆稳定计算。

（一）倾覆稳定计算简图

从安全和计算操作方便的角度考虑，独立基础假定基础处于倾覆稳定极限平衡状态时，不考虑基柱和底板的侧向被动土压力的作用，同时忽略地基反力的影响，只考虑柱顶水平力、垂直力、基础和底板上方土的重力对于倾覆点的力矩保持平衡。

图 9-28（a）、（b）以水平力合力方向在底板上的投影线与底板上、下边缘的交点 O 点为倾覆点，这是一种简化。

基础上拔倾覆时，当上拔土体达到极限状态时，对应基础的侧面土抗力将遭到破坏，不能参加抗倾覆工作，仅上拔倒锥土体及基础重力参加抗倾覆工作。上拔倾覆稳定的计算简图见图 9-28（a）。

基础下压倾覆时，考虑垂直力、基础和底板正上方土的重力参加抗倾覆工作。下压倾覆稳定的计算简图见图 9-28（b）。

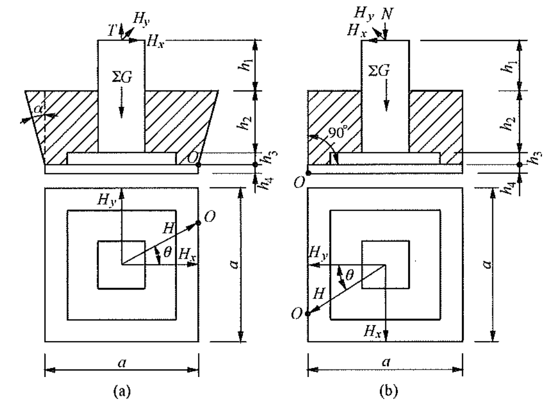


图 9-28　独立基础倾覆稳定计算简图

（a）上拔倾覆稳定；（b）下压倾覆稳定

（二）上拔时倾覆稳定计算

如图 9-28（a）所示，以水平力合力方向在底板上的投影线与底板上边缘的交点 O 点为倾覆点，则：

$$\gamma_f\left[T\frac{a}{2\cos\theta}+H(h_1+h_2+h_3)\right]\leqslant\gamma_E\sum G\frac{a}{2\cos\theta} \quad (9\text{-}136)$$

$$\gamma_f\left[T\frac{a}{2}+H_x(h_1+h_2+h_3)\right]\leqslant\gamma_E\sum G\frac{a}{2} \quad (9\text{-}137)$$

$$\left.\begin{aligned}&\gamma_f\left[T\frac{a}{2}+H_y(h_1+h_2+h_3)\right]\leqslant\gamma_E\sum G\frac{a}{2}\\ &\sum G=Q_f+G_0\end{aligned}\right\} \quad (9\text{-}138)$$

式中 γ_f——基础附加分项系数，按表 9-7 确定；

γ_E——水平力影响系数，根据水平力合力与上拔力的比值按表 9-4 确定；

H——水平力的合力，kN，$H=\sqrt{H_X^2+H_Y^2}$；

θ——水平力合力方向与 X-X 方向的夹角，（°）；

T——上拔力设计值，kN；

$\sum G$——起抗拔作用的土体重和基础自重，根据地下水情况选取其容重或浮容重进行计算；

a——基础底板正面长，m；

h_1——基柱露头高度，m；

h_2——基柱埋入土体高度，m；

h_3——上台阶高度，m；

Q_f——基础自重力，kN；

G_0——基础底面上方起抗拔作用的锥体土的重力，kN。

（三）下压时倾覆稳定计算

如图 9-28（b）所示，以水平力合力方向在底板上的投影线与底板下边缘的交点 O 点为倾覆点，则

$$\gamma_f\left[H(h_1+h_2+h_3+h_4)-N\frac{a}{2\cos\theta}\right]\leqslant\gamma_E\sum G\frac{a}{2\cos\theta} \tag{9-139}$$

$$\gamma_f\left[H_x(h_1+h_2+h_3+h_4)-N\frac{a}{2}\right]\leqslant\gamma_E\sum G\frac{a}{2} \tag{9-140}$$

$$\gamma_f\left[H_y(h_1+h_2+h_3+h_4)-N\frac{a}{2}\right]\leqslant\gamma_E\sum G\frac{a}{2} \tag{9-141}$$

式中 N——下压力设计值，kN；

$\sum G$——下压力工况时，起抗倾覆作用的土体重和基础自重，根据地下水情况选取其容重或浮容重进行计算，$\sum G=Q_f+G_{to}$，Q_f 为基础自重力，G_{to} 为基础底面正上方土的重力，kN；

θ——水平力合力方向与 X-X 方向的夹角，(°)；

h_4——下台阶高度，m。

第四节 基础强度计算和构造要求

本节结合工程实践，针对架空输电线路工程中的钢筋混凝土基础、混凝土基础和石材基础的主柱、底板的正截面承载力计算以及地脚螺栓承载力计算给出计算方法以及构造要求。

一、钢筋混凝土基础

（一）矩形截面双向偏心受压主柱

当纵向钢筋对称配置，其正截面受压承载力可按基于弹性理论应力叠加原理的倪克勤公式，即下列近似公式进行计算

$$N\leqslant\frac{1}{\dfrac{1}{N_{ux}}+\dfrac{1}{N_{uy}}-\dfrac{1}{N_{u0}}} \tag{9-142}$$

式中 N——双向偏心受压时，在 X 轴和 Y 轴方向的偏心距分别为 $\eta_x e_{ix}$ 和 $\eta_y e_{iy}$ 时截面的轴向压力设计值，kN；

N_{u0}——截面轴心受压承载力设计值，kN，$N_{u0}=f_cA+f_y'A_s'$；

N_{ux}——轴心压力作用于 X 轴并考虑相应的计算偏心距 $\eta_x e_{ix}$ 后，按全部纵向普通钢筋计算的构件偏心受压承载力设计值，kN；

N_{uy}——轴心压力作用于 Y 轴并考虑相应的计算偏心距 $\eta_y e_{iy}$ 后，按全部纵向普通钢筋计算的构件偏心受压承载力设计值，kN；

f_c——混凝土轴心抗压强度设计值，kN/m²；

A——主柱截面面积，m²；

f_y'——钢筋抗压强度设计值，kN/m²；

A_s'——全部纵向普通钢筋的截面面积，m²；

η_x、η_y——在 X 轴、Y 轴方向的轴向力偏心距增大系数；

e_{ix}、e_{iy}——轴向力在 X 轴、Y 轴方向的计算偏心距，m。

对矩形、环形和圆形截面偏心受压构件，其偏心距增大系数 η_x、η_y 可按下列公式计算

$$\eta=1+\frac{1}{1400e_i/h_0}\left(\frac{l_0}{h}\right)^2\xi_1\xi_2 \tag{9-143}$$

$$\xi_1=\frac{0.5f_cA}{N} \tag{9-144}$$

$$\xi_2=1.15-0.01\frac{l_0}{h} \tag{9-145}$$

式中 l_0——构件的计算长度，m。

h——截面高度；其中，对环形截面，取外直径；对圆形截面，取直径，m。

h_0——截面有效高度，m；其中，对环形截面，取 $h_0=r_2+r_s$；对圆形截面，取 $h_0=r+r_s$，r_2 为环形截面外半径，m，r 为圆形截面半径，r_s 为纵筋重心所在圆周的半径，m。

ξ_1——偏心受压构件的截面曲率修正系数，当 $\xi_1>1.0$ 时，取 $\xi_1=1.0$。

A——构件的截面面积，m²。

ξ_2——构件长细比对截面曲率的影响系数，当 $l_0/h<15$ 时，取 $\xi_2=1.0$。

注：当偏心受压构件的长细比 $l_0/i\leqslant17.5$ 时，可取 $\eta=1.0$。

构件的偏心受压承载力设计值 N_{ux} 和 N_{uy}，当纵向普通钢筋沿截面腹部均匀配置时，可按式（9-146）～式（9-149）计算。

$$N\leqslant\alpha_1f_c\xi bh_0+f_y'A_s'-\sigma_sA_s+N_{sw} \tag{9-146}$$

$$N\eta e\leqslant\alpha_1f_c\xi(1-0.5\xi)bh_0^2+f_y'A_s'(h_0-a_s')+M_{sw} \tag{9-147}$$

$$N_{sw}=\left(1+\frac{\xi-\beta_1}{0.5\beta_2\omega}\right)f_{yw}A_{sw} \tag{9-148}$$

$$M_{sw}=\left[0.5-\left(\frac{\xi-\beta_1}{\beta_1\omega}\right)^2\right]f_{yw}A_{sw}h_{sw} \tag{9-149}$$

式中 A_{sw}——沿截面腹部均匀配置的全部纵向钢筋截面面积，m²；

f_{yw}——沿截面腹部均匀配置的纵向钢筋强度设计值，kN/m²；

N_{sw}——沿截面腹部均匀配置的纵向钢筋所承担的轴向压力，kN，当 $\xi>\beta_1$ 时，取 $\xi=\beta_1$ 计算；

M_{sw}——沿截面腹部均匀配置的纵向钢筋的内力对 A_s 重心的力矩，kN·m，当 $\xi>\beta_1$ 时，取 $\xi=\beta_1$ 计算；

ω——均匀配置纵向钢筋区段的高度 h_{sw} 与截面有效高度 h_0 的比值，$\omega=h_{sw}/h_0$，宜取 $h_{sw}=h_0-a_s'$；

ξ——截面的相对受压区高度，即 $\frac{x}{h_0}$，x 为等效矩形应力图形的混凝土受压区高度，m；

α_1——当混凝土强度等级不超过 C50 时，α_1 取为 1.0，当混凝土强度等级为 C80 时，α_1 取为 0.94，其间按线性内插法确定；

b——矩形截面的宽度，m；

a_s'——受压区纵向普通钢筋合力点至截面受压边缘的距离，m；

σ_s——受拉边或受压较小边的纵向普通钢筋的应力，kN/m²。当 ξ 不大于 ξ_b 时为大偏心受压构件，σ_s 取为 f_y，当 ξ 大于 ξ_b 时为小偏心受压构件，$\sigma_s=\frac{f_y}{\xi_b-\beta_1}\left(\frac{x}{h_{0i}}-\beta_1\right)$，$h_{0i}$ 为纵向钢筋截面重心至截面受压边缘的距离，m；

ξ_b——截面的相对界限受压区高度，对于有屈服点钢筋，则 $\xi_b=\frac{\beta_1}{1+\frac{f_y}{E_s\varepsilon_{cu}}}$；

β_1——系数，当混凝土强度等级不超过 C50 时，β_1 取为 0.80，当混凝土强度等级为 C80 时，β_1 取为 0.74，其间按线性内插法确定；

ε_{cu}——正截面的混凝土极限压应变，当混凝土强度等级大于等于 C50 时，取为 0.0033，小于 C50 时，$\varepsilon_{cu}=0.0033-(f_{cu,k}-50)\times10^{-5}$，其中 $f_{cu,k}$ 为混凝土立方体抗压强度标准值。

（二）矩形截面双向偏心受拉主柱

（1）当双向对称配筋的矩形截面钢筋混凝土双向偏心受拉构件根据架空输电线路基础设计技术规程进行计算时，按下式进行计算：

$$\left.\begin{aligned}A_s&\geqslant 2T_E\left(\frac{1}{2}+\frac{e_{0x}}{Z_x}+\frac{e_{0y}}{Z_y}\right)\frac{\gamma_{ag}}{f_y}\\A_{sy}&\geqslant 2T_E\left(\frac{n_y}{n}+\frac{2e_{0y}}{n_xZ_y}+\frac{e_{0x}}{Z_x}\right)\frac{\gamma_{ag}}{f_y}\\A_{sx}&\geqslant 2T_E\left(\frac{n_x}{n}+\frac{2e_{0x}}{n_yZ_x}+\frac{e_{0y}}{Z_y}\right)\frac{\gamma_{ag}}{f_y}\end{aligned}\right\} \tag{9-150}$$

式中 A_s——正截面的全部纵向钢筋截面面积，m²；

A_{sx}——正截面平行于 X 轴两侧钢筋的截面面积，m²；

A_{sy}——正截面平行于 Y 轴两侧钢筋的截面面积，m²；

e_{0x}——T_E 沿 X 轴方向的偏心距，m；

e_{0y}——T_E 沿 Y 轴方向的偏心距，m；

Z_x——平行于 Y 轴两侧纵向钢筋截面面积重心间距，m；

Z_y——平行于 X 轴两侧纵向钢筋截面面积重心间距，m；

n——截面内纵向钢筋总根数；

n_x——平行于 X 轴方向一侧钢筋根数；

n_y——平行于 Y 轴方向一侧钢筋根数；

γ_{ag}——钢筋配筋调整系数，$\gamma_{ag}=1.1$。

（2）当双向对称配筋的矩形截面钢筋混凝土双向偏心受拉构件根据混凝土结构设计规范进行计算时，即

$$N\leqslant\frac{1}{\frac{1}{N_{u0}}+\frac{e_0}{M_u}} \tag{9-151}$$

式中 N_{u0}——构件的轴心受拉承载力设计值，kN；

e_0——轴向拉力作用点至截面重心的距离，m；

M_u——按通过轴向拉力作用点的弯矩平面计算的正截面受弯承载力设计值，kN·m；

N——意义同 T_E，kN，代表双向偏心受拉拉力。

在进行配筋设计时，按以下所述考虑 N_{u0}、$\frac{e_0}{M_u}$ 的计算：

$$N_{u0}=f_yA_s=f_y[2(A_{sx}+A_{sy})-4A_{sj}]=4(A_{sx}-A_{sj})f_y \tag{9-152}$$

双向对称配筋时，$A_{sx}=A_{sy}$，A_{sj} 为一根角部钢筋的面积，则 $A_{sj}=\dfrac{A_{sx}}{2n_x}$；

$\dfrac{e_0}{M_u}$ 可按下式计算：

$$\left.\begin{aligned}\frac{e_0}{M_u}&=\sqrt{\left(\frac{e_{0x}}{M_{ux}}\right)^2+\left(\frac{e_{0y}}{M_{uy}}\right)^2}\\M_{ux}&=f_yA_{sx}\left(h_0-a_s'\right)\\M_{uy}&=f_yA_{sy}\left(b_0-a_s'\right)\end{aligned}\right\}\qquad(9\text{-}153)$$

式中 e_{0x}、e_{0y}——轴向拉力对通过截面重心的 y 轴、x 轴的偏心距，m；

M_{ux}、M_{uy}——双向对称配筋时，x 轴、y 轴方向的正截面受弯承载力设计值，kN·m。

对于方柱，$b_0=h_0$，双向对称配筋时 $A_{sx}=A_{sy}$，则将 $M_{ux}=M_{uy}$ 代入上式即

$$\frac{e_0}{M_u}=\sqrt{\left(\frac{e_{0x}}{M_{ux}}\right)^2+\left(\frac{e_{0y}}{M_{uy}}\right)^2}=\frac{1}{f_yA_{sx}\left(h_0-a_s'\right)}\sqrt{e_{0x}^2+e_{0y}^2}$$

将 N_{u0}、$\dfrac{e_0}{M_u}$ 即式（9-152）和式（9-153）代入式（9-151），则有

$$a=\frac{N}{4f_y\left(1-\dfrac{1}{n_x}\right)}+\frac{N\sqrt{e_{0x}^2+e_{0y}^2}}{f_y'\left(h_0-a_s'\right)}\leqslant A_{sx}\qquad(9\text{-}154)$$

A_s 可以表达为 A_{sx}、A_{sy} 的函数：

$$A_s=2\left(A_{sx}+A_{sy}\right)-4A_{sj}=4A_{sx}\left(1-\frac{1}{2n_x}\right)\qquad(9\text{-}155)$$

按式（9-154）、式（9-155）即可对双向偏心受拉双向对称配筋构件进行配筋计算。

（三）圆形截面偏心受压主柱

沿周边均匀配置纵向普通钢筋（钢筋数量不少于6 根）的圆形截面钢筋混凝土偏心受压构件（见图9-29），其正截面受压承载力根据混凝土结构设计规范，宜符合下列规定：

$$N\leqslant\alpha\alpha_1f_cA\left(1-\frac{\sin2\pi\alpha}{2\pi\alpha}\right)+\left(\alpha-\alpha_t\right)f_yA_s\qquad(9\text{-}156)$$

$$N\eta e_i\leqslant\frac{2}{3}\alpha_1f_cAr\frac{\sin^3\pi\alpha}{\pi}+f_yA_sr_s\frac{\sin\pi\alpha+\sin\pi\alpha_t}{\pi}\qquad(9\text{-}157)$$

$$\alpha_t=1.25-2\alpha\qquad(9\text{-}158)$$

$$e_i=e_0+e_a\qquad(9\text{-}159)$$

式中 A——圆形截面面积，m^2；

A_s——全部纵向普通钢筋的截面面积，m^2；

r——圆形截面的半径，m；

r_s——纵向普通钢筋重心所在圆周的半径，m；

e_0——轴向压力对截面重心的偏心距，m；

e_a——附加偏心距，m，其值应取 20mm 和偏心方向截面最大尺寸的 1/30 两者中的较大值；

η——偏心距增大系数，当按偏心受压构件计算高桩（$l_0/D_0>7$）时，应考虑构件在弯矩作用平面内的挠度对纵向力偏心距的影响；

α_1——当混凝土强度等级不超过 C50 时，α_1 取为 1.0，当混凝土强度等级为 C80 时，α_1 取为 0.94，其间按线性内插法确定；

α——对应于受压混凝土截面面积的圆心角（rad）与 2π 的比值；

α_t——纵向受拉普通钢筋截面面积与全部纵向普通钢筋截面面积的比值，当 α 大于 0.625 时，取 α_t 为 0。

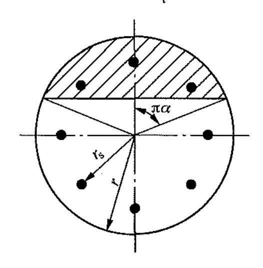


图 9-29 沿周边均匀配筋的圆形截面

（四）环形截面偏心受压主柱

沿周边均匀配置纵向钢筋的环形截面偏心受压构件，根据混凝土结构设计规范，其正截面受压承载力宜符合下列规定

$$N\leqslant\alpha\alpha_1f_cA+\left(\alpha-\alpha_t\right)f_yA_s\qquad(9\text{-}160)$$

$$N\eta e_i\leqslant\alpha_1f_cA\left(r_1+r_2\right)\frac{\sin\pi\alpha}{2\pi}+f_yA_sr_s\frac{\sin\pi\alpha+\sin\pi\alpha_t}{\pi}\qquad(9\text{-}161)$$

$$\alpha_t=1-1.5\alpha\qquad(9\text{-}162)$$

$$e_i=e_0+e_a\qquad(9\text{-}163)$$

式中 A——环形截面面积，m^2；

r_1、r_2——环形截面的内、外半径，m；

α——受压区混凝土截面面积与全截面面积的比值；

α_t——纵向受拉钢筋截面面积与全部纵向钢筋截面面积的比值，当 α 大于 2/3 时，取 α_t 为 0。当 α 小于 $\arccos\left(\dfrac{2r_1}{r_1+r_2}\right)/\pi$ 时，环形截面偏心受压构件可按圆形截面偏心受压构件正截面受压承载力公式计算。

（五）矩形截面受弯主柱和梁

（1）矩形截面正截面受弯承载力，根据混凝土结构设计规范，应符合下列规定

$$M \leqslant \alpha_1 f_c bx\left(h_0 - \frac{x}{2}\right) + f'_y A'_s(h_0 - a'_s) \quad (9\text{-}164)$$

混凝土受压区高度应按下列公式确定

$$\alpha_1 f_c bx = f_y A_s - f'_y A'_s \quad (9\text{-}165)$$

混凝土受压区高度尚应符合下列条件

$$x \leqslant \xi_b h_0 \quad (9\text{-}166)$$

$$x \geqslant 2a'_s \quad (9\text{-}167)$$

式中 M——弯矩设计值，kN·m；

α_1——当混凝土强度等级不超过 C50 时，α_1 取为 1.0，当混凝土强度等级为 C80 时，α_1 取为 0.94，其间按线性内插法确定；

f_c——混凝土轴心抗压强度设计值，kN/m²；

A_s、A'_s——受拉区、受压区纵向普通钢筋的截面面积，m²；

b——矩形截面的宽度，m；

h_0——截面有效高度，m；

a'_s——受压区纵向普通钢筋合力点至截面受压边缘的距离，m。

（2）当计算中计入纵向普通受压钢筋时，应满足式（9-167）的条件；当不满足此条件时，正截面受弯承载力应符合下列规定。

$$M \leqslant f_y A_s(h - a_s - a'_s) \quad (9\text{-}168)$$

式中 a_s——受拉区纵向普通钢筋至受拉边缘的距离，m。

（六）圆形截面受弯主柱

沿周边均匀配置纵向普通钢筋（纵向普通钢筋的数量不少于 6 根）的圆形截面受弯构件的正截面受弯承载力，根据混凝土结构设计规范附录 E，宜符合下列规定：

$$\alpha\alpha_1 f_c A\left(1 - \frac{\sin 2\pi\alpha}{2\pi\alpha}\right) + (\alpha - \alpha_t) f_y A_s = 0 \quad (9\text{-}169)$$

$$M \leqslant \frac{2}{3}\alpha_1 f_c A r \frac{\sin^3 \pi\alpha}{\pi} + f_y A_s r_s \frac{\sin \pi\alpha + \sin \pi\alpha_t}{\pi} \quad (9\text{-}170)$$

$$\alpha_t = 1.25 - 2\alpha \quad (9\text{-}171)$$

$$e_i = e_0 + e_a \quad (9\text{-}172)$$

式中 A——圆形截面面积，m²；

A_s——全部纵向普通钢筋的截面面积，m²；

r——圆形截面的半径，m；

r_s——纵向普通钢筋重心所在圆周的半径，m；

e_0——轴向压力对截面重心的偏心距，m；

e_a——附加偏心距，m，其值应取 20mm 和偏心方向截面最大尺寸的 1/30 两者中的较大值；

α——对应于受压混凝土截面面积的圆心角（rad）与 2π 的比值；

α_t——纵向受拉普通钢筋截面面积与全部纵向普通钢筋截面面积的比值，当 α 大于 0.625 时，取 α_t 为 0。

（七）环形截面受弯主柱

沿周边均匀配置纵向钢筋的环形截面受弯构件的正截面受弯承载力，根据混凝土结构设计规范附录 E，宜符合下列规定：

$$\alpha\alpha_1 f_c A + (\alpha - \alpha_t) f_y A_s = 0 \quad (9\text{-}173)$$

$$M \leqslant \alpha_1 f_c A(r_1 + r_2)\frac{\sin \pi\alpha}{2\pi} + f_y A_s r_s \frac{\sin \pi\alpha + \sin \pi\alpha_t}{\pi} \quad (9\text{-}174)$$

$$\alpha_t = 1 - 1.5\alpha \quad (9\text{-}175)$$

$$e_i = e_0 + e_a \quad (9\text{-}176)$$

式中 A——环形截面面积，m²；

A_s——全部纵向普通钢筋的截面面积，m²；

r_1、r_2——环形截面的内、外半径，m；

r_s——纵向普通钢筋重心所在圆周的半径，m；

e_0——轴向压力对截面重心的偏心距，m；

e_a——附加偏心距，m，其值应取 20mm 和偏心方向截面最大尺寸的 1/30 两者中的较大值；

α——受压区混凝土截面面积与全截面面积的比值，当 α 小于 $\arccos\left(\frac{2r_1}{r_1 + r_2}\right)/\pi$ 时，环形截面受弯构件可按圆形截面受弯构件正截面受弯承载力公式计算；

α_t——纵向受拉钢筋截面面积与全部纵向钢筋截面面积的比值，当 α 大于 2/3 时，取 α_t 为 0。

（八）圆形截面、环形截面偏心受拉主柱

（1）根据混凝土结构设计规范，沿周边均匀配置纵向钢筋的环形和圆形截面偏心受拉构件，其正截面受拉承载力，应符合下列公式的要求：

$$N \leqslant \frac{1}{\frac{1}{N_{u0}} + \frac{e_0}{M_u}} \quad (9\text{-}177)$$

式中 N_{u0}——构件的轴心受拉承载力设计值，kN；

e_0——轴向拉力作用点至截面重心的距离，m；

M_u——按通过轴向拉力作用点的弯矩平面计算的正截面受弯承载力设计值，kN·m，可按圆形截面、环形截面受弯构件的正截面受弯承载力计算公式进行计算。

（2）根据架空输电线路基础设计技术规程，钢筋混凝土圆形截面偏心受拉（拉弯）构件截面的纵向钢筋截面面积也可按下列规定进行计算（见图9-30）。

1）当 e_0 大于计算截面中心至纵向钢筋截面中心距离1/2（$e_0>r_g/2$）时，按式（9-178）确定：

$$A_s=\gamma_{bg}\alpha_1\frac{A_h f_c}{f_y} \tag{9-178}$$

式中 α_1——按式（9-179）、式（9-180）确定；

γ_{bg}——钢筋配筋调整系数，$\gamma_{bg}=1.28$。

$$\left[\alpha_1\left(1-\frac{2\psi}{\pi}\right)-\frac{\psi}{\pi}+\frac{\sin 2\psi}{2\pi}\right]\frac{e_0}{D_0}-\alpha_1\left(\frac{D_0-2a_g}{D_0}\right)\times\frac{\sin\psi}{\pi}-\frac{\sin^3\psi}{3\pi}=0 \tag{9-179}$$

$$n_1\frac{e_0}{D_0}-\alpha_1\left(\frac{D_0-2a_g}{D_0}\right)\frac{\sin\psi}{\pi}-\frac{\sin^3\psi}{3\pi}=0 \tag{9-180}$$

式中 a_g——截面边缘至纵向钢筋截面中心的距离，m。

当 $e_0/D_0=0.25\sim4.0$，$a_g=0.05D_0\sim0.1D_0$ 时，α_1 可按图9-31查取。

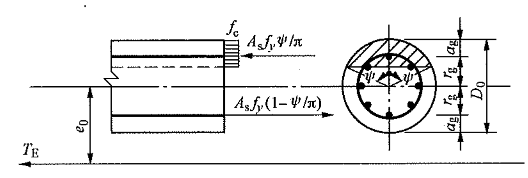


图9-30 圆形截面偏心受拉构件（$e_0>r_g/2$）正截面承载力计算简图

2）当 e_0 不大于计算截面中心至纵向钢筋截面中心距离1/2（$e_0\leqslant r_g/2$）时，按式（9-181）或式（9-182）确定：

①当不考虑钢筋应力塑性分布（见图9-32）时，可按式（9-181）计算

$$A_s=\frac{1.1T_E}{f_y}\left(1+\frac{2.0e_0}{r_g}\right) \tag{9-181}$$

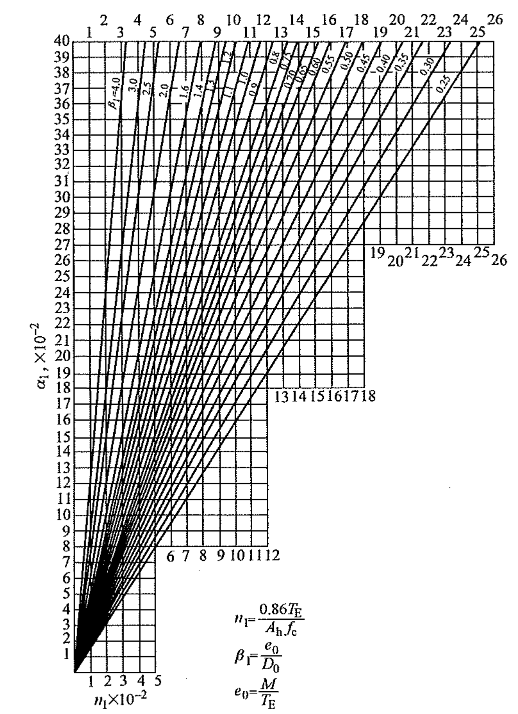
②当考虑钢筋应力塑性分布（见图9-33）时，可按式（9-182）计算

$$A_s=\frac{1.1T_E}{f_y}\left(1+\frac{1.25e_0}{r_g}\right) \tag{9-182}$$

式中 r_g——计算截面中心至纵向钢筋截面中心的距离，m。

（九）钢筋混凝土基础底板正截面承载力计算

（1）当台阶的宽高比不大于2.5和偏心距不大于1/6基础宽度时，计算截面的弯矩可按下列公式计算：



式中 M——作用于计算截面重心的弯矩，kN·m；

D_0——计算截面直径，m；

A_h——计算截面混凝土面积，m²。

图9-31 $\alpha_1=f(n_1、\beta_1)$ 关系图

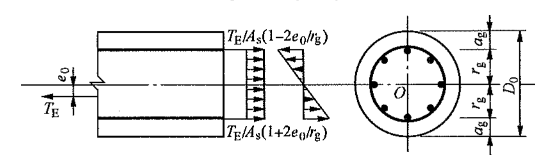


图9-32 圆形截面偏心受拉构件（$e_0\leqslant r_g/2$）正截面承载力（不考虑塑性分布）计算简图

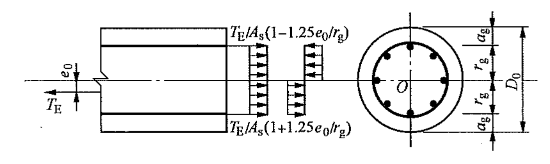


图9-33 圆形截面偏心受拉构件（$e_0\leqslant r_g/2$）正截面承载力（考虑塑性分布）计算简图

1）矩形底板中心受压或受拉（图9-34）时，可按式（9-183）和式（9-184）计算：

$$M_{1-1}=\frac{P_0}{24}(b-b_1)^2(2l+l_1) \tag{9-183}$$

$$M_{2-2}=\frac{P_0}{24}(l-l_1)^2(2b+b_1) \tag{9-184}$$

式中 P_0——底板平均净压力设计值，kPa，$P_0=\frac{F}{bl}$，

当计算上拔情况时，$P_0=\frac{T_E}{bl-b_1l_1}$，kPa；

b_1 和 l_1——底板处柱截面的长度和宽度，m。

2）矩形底板单向受弯（见图 9-35）时，可按式（9-185）计算：

$$M_{1-1}=\frac{P_1}{24}(b-b_1)^2(2l+l_1) \qquad (9\text{-}185)$$

式中 P_1——底板Ⅰ（图 9-35 阴影部分）平均压力设计值，kPa；

$P_1=\frac{P_{max}+P_c}{2}$，$P_{max}=\frac{F}{bl}+\frac{M_x}{W_y}$ P_c 为 1-1 截面处反力；当计算上拔情况时，$P_{max}=\frac{T_E}{bl-b_1l_1}+\frac{6M_xb}{lb^3-l_1b_1^3}$。

3）矩形底板双向受弯（见图 9-36）时，可按式（9-186）计算：

$$M_{2-2}=\frac{P_2}{24}(l-l_1)^2(2b+b_1) \qquad (9\text{-}186)$$

式中 P_2——底板Ⅱ（图 9-36 阴影部分）平均压力设计值，kPa。

$P_2=\frac{P'_{max}+p'_c}{2}$，$P'_{max}=\frac{F}{bl}+\frac{M_y}{W_x}$；$p'_c$ 为 2-2 截面处反力，当计算上拔情况时，$P_{max}=\frac{T_E}{bl-b_1l_1}+\frac{6M_xl}{bl^3-b_1l_1^3}$。

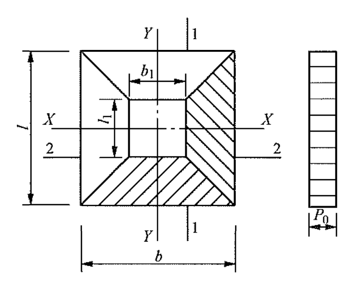


图 9-34 矩形底板轴向力作用时弯矩计算简图

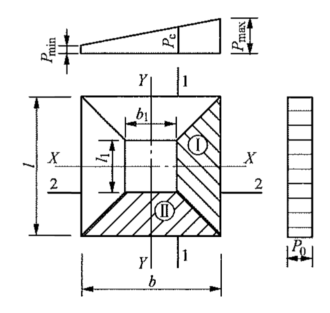


图 9-35 矩形底板单向受弯时弯矩计算简图

（2）钢筋混凝土矩形底板的正截面受拉钢筋一般按单筋矩形截面计算，其纵向受拉钢筋截面面积可按式（9-187）计算：

$$A_s=\frac{M}{(h_0-0.5x)f_y} \qquad (9\text{-}187)$$

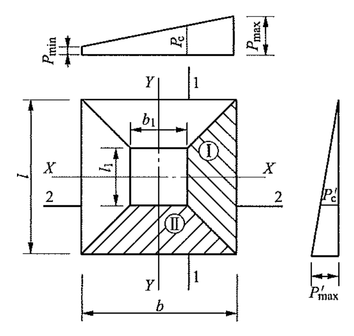


图 9-36 矩形底板双向受弯时弯矩计算简图

式中 x——混凝土受压区高度，$x=h_0-\sqrt{h_0^2-\frac{2M}{f_cb}}$，m；

A_s——垂直于 $M_Ⅰ$ 或 $M_Ⅱ$ 截面的底板下部（承压时）或上部（承拉时）纵向受拉钢筋截面面积，m²；

h_0——底板计算截面的有效高度，m；

M——计算截面 1-1 或 2-2 处的弯矩设计值，kN·m。

（3）底板在下压荷载作用下，当无上部纵向钢筋和腹筋时，底板的受冲切承载力应满足下列要求：

1）矩形截面柱作用于矩形底板时（见图 9-37），在柱与基础交接处以及基础变阶处的受冲切承载力可按下列公式计算：

$$F_l \leqslant 0.7\beta_{hp}f_ta_mh_0 \qquad (9\text{-}188)$$

$$F_l=p_jA_l \qquad (9\text{-}189)$$

$$a_m=\frac{a_t+a_b}{2} \qquad (9\text{-}190)$$

式中 β_{hp}——受冲切承载力截面高度影响系数，当 $h\leqslant0.8$m 时，取 $\beta_{hp}=1.0$，当 $h\geqslant2.0$m 时，取 $\beta_{hp}=0.9$，其间按线性内插法取用；

a_t——冲切破坏锥体最不利一侧斜截面上边长，m，当计算柱与基础交接处的受冲切承载力时，取柱宽，当计算基础变阶处的受冲切承载力时，取上阶宽；

a_b——冲切破坏锥体最不利一侧斜截面在基础底面积范围内的下边长，m，当冲切破坏锥体的底面落在基础底面以内[见图 9-37（a）、（b）]，计算柱与基础交接处的受冲切承载力时，取柱宽加两倍基础有效高度，当计算基础变阶处的受冲切承载力时，取上阶宽加两倍该处的基础有效高度，当冲切破坏锥体的底面在 l 方向落在基础底面以

外，即 $a+2h_0>l$ 时［见图 9-37（c）］，$a_b=l$；

h_0——基础冲切破坏锥体的有效高度，m；

A_l——考虑冲切荷载时取用多边形面积（图 9-37 中阴影面积），m^2；

p_j——扣除基础自重及其上土重的荷载设计值作用下地基土单位面积净反力，对偏心受压基础可取用基础边缘处最大地基土单位面积净反力，kN/m^2；

a_m——冲切破坏锥体最不利一侧计算长度，m；

F_l——作用在 A_l 上的地基土净反力设计值，kN。

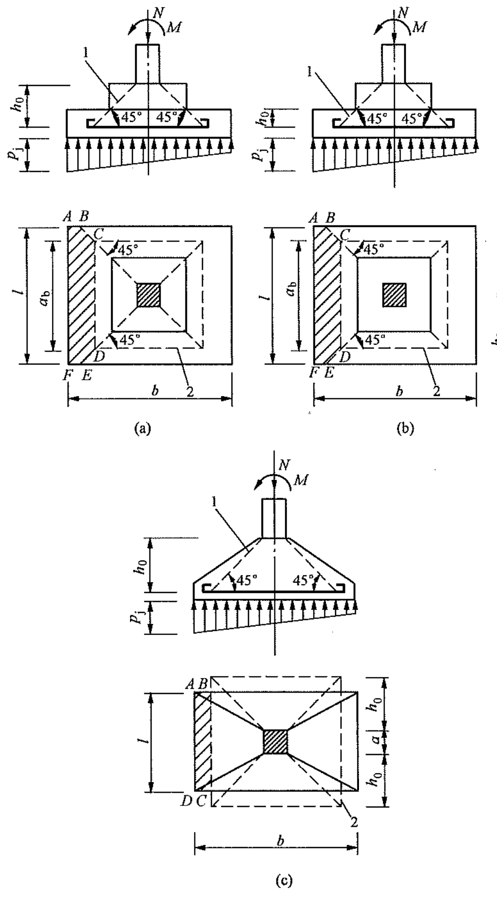


图 9-37 阶形基础受冲切承载力计算截面位置

(a) 柱与基础交接处；(b) 基础变阶处（一）；(c) 基础变阶处（二）

1—冲切破坏锥体最不利一侧的斜截面；

2—冲切破坏锥体的底面线

2）圆形和环形截面柱作用于底板的冲切承载力可按式（9-191）计算：

$$F_l \leqslant 0.7\beta_{hp} f_t (d_0+h_0)\pi h_0 \tag{9-191}$$

$$F_l = N_0\left[1-\frac{\pi}{4bl}(d_0+2h_0)^2\right] \tag{9-192}$$

式中 N_0——扣除底板上土重的作用于底板上的轴向压力设计值，kN；

d_0——柱的外径，m。

（4）底板在上拔荷载作用下（图 9-38），当无腹筋时可按式（9-193）计算抗剪承载能力，即

$$V \leqslant 0.6 b_0 h_0 f_t \tag{9-193}$$

$$V = \frac{P_{max}+P_x}{2}A_{cx} \tag{9-194}$$

式中 b_0——计算截面 X—X 中和轴处宽度，m；

h_0——计算截面有效高度，m；

A_{cx}——图 9-38 中阴影部分面积，m^2。

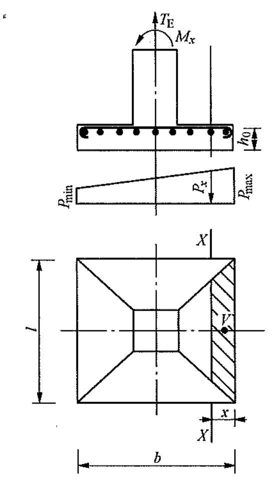


图 9-38 底板上拔时剪切承载力计算简图

（十）钢筋混凝土拉线盘、卡盘和拉线部件的承载力计算

（1）拉线盘正截面的纵向受拉钢筋面积可近似按图 9-39 中 1-1、2-2 截面产生的弯矩（$F_{L1}e_1$ 和 $F_{L2}e_2$）求得。当短边 b 很小时尚应对正截面的受压区进行混凝土承载力计算。

（2）拉线盘的截面应符合抗剪承载力的要求（见图 9-39），对无腹筋截面宜按式（9-193）计算，此时 $V=qx$，$b_0=b$（短边长度）。

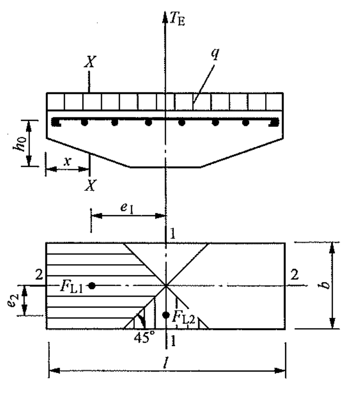


图 9-39 拉线盘承载力计算简图

（3）卡盘正截面受拉钢筋截面面积，可按双筋截面或单筋截面计算，此时应计算受压区混凝土承载力。

（4）卡盘的截面应符合抗剪承载力的要求，对无腹筋截面可按式（9-193）计算，此时 $V=qx$，$b_0=b$（见图 9-40）。

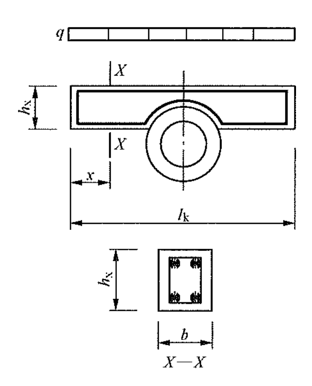


图 9-40 卡盘承载力计算简图

（5）拉线棒承载力应按式（9-195）计算。

$$T_E \leqslant A_f f_y \tag{9-195}$$

式中 A_f ——单根钢筋截面面积，mm²；

f_y ——钢筋抗拉强度设计值，N/mm²，按表 9-58 确定。

当满足承载力计算要求时，再将拉线棒计算直径增加 2～4mm，且不小于 16mm。

（6）拉环承载力应按式（9-196）计算。

$$T_E \leqslant 1.5 A_f f_\tau \tag{9-196}$$

式中 f_τ——钢筋抗剪强度设计值，N/mm²，按表 9-58 确定。

当满足承载力计算要求时，再将拉环计算直径增加 2～4mm，且不小于 16mm。

（十一）斜截面承载力计算

矩形截面的钢筋混凝土偏心受拉构件和偏心受压构件，其斜截面的受剪承载力应分别按式（9-197）和式（9-198）计算：

$$V_{cs} = \frac{1.75}{\lambda+1} f_t b h_0 + f_y \frac{n A_{sv1}}{s} h_0 - 0.2 N_m \tag{9-197}$$

$$V_{cs} = \frac{1.75}{\lambda+1} f_t b h_0 + f_y \frac{n A_{sv1}}{s} h_0 + 0.07 N_m \tag{9-198}$$

式中 V_{cs} ——构件斜截面上混凝土和箍筋的受剪承载力设计值，kN；

h_0 ——截面的有效高度，m；

n ——同一截面内箍筋的肢数；

A_{sv1} ——单肢箍筋的截面面积，m²；

s ——沿构件长度方向的箍筋间距，m；

λ ——偏心受力构件计算截面的剪跨比，取为 $M/(Vh_0)$，当 λ 小于 1.5 时，取 1.5，当 λ 大于 3 时，取 3；其中 V 和 M 分别为计算截面上的剪力设计值和弯矩设计值；

N_m ——与剪力设计值 V 相应的轴向拉力设计值或轴向压力设计值，kN，当 N_m 作为轴向压力设计值大于 $0.3f_cA$ 时，取 $0.3f_cA$，此时，A 为构件的截面面积，m²。

当式（9-197）和式（9-198）右边的计算值小于 $f_y \frac{nA_{sv1}}{s} h_0$ 时，应取等于 $f_y \frac{nA_{sv1}}{s} h_0$，且 $f_y \frac{nA_{sv1}}{s} h_0$ 值不应小于 $0.36 f_t b h_0$。

二、混凝土基础

用于铁塔基础的混凝土基础有塔脚主材插入型和地脚螺栓锚固型，如图 9-41 所示。

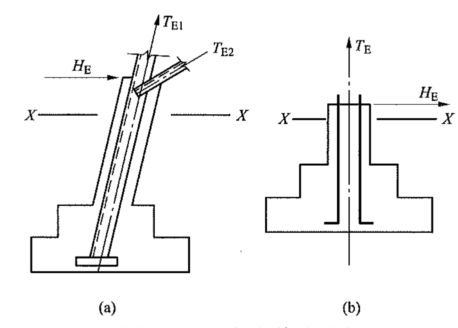


图 9-41 混凝土基础型式

（a）主材插入型；（b）地脚螺栓锚固型

（一）混凝土基础主柱正截面承载力计算

（1）混凝土受拉构件的正截面承载力应按下式计算：

$$\frac{T_E}{A_h} + \frac{M_s}{\gamma_1 W_0} \leqslant 0.59 f_t \tag{9-199}$$

式中 M_s——作用计算截面 X-X 上的弯矩，kN·m；

A_h ——计算截面混凝土面积，m²；

W_0——混凝土计算截面弹性抵抗矩，m³；

γ_1 ——受拉区混凝土塑性影响系数；矩形截面时取 $1.55\times(0.7+120/h)$，圆形截面时取 $1.60\times(0.7+60/r)$；

h ——截面高度，当 $h<400$ 时取 $h=400$，当 $h>1600$ 时取 $h=1600$，mm；

f_t ——混凝土的轴心抗拉强度设计值，kN/m²。

（二）混凝土基础底板正截面承载力计算

（1）混凝土基础底板在下压荷载作用时，其基底压力 P（不包括土及底板重）不得大于表 9-46 的 P_0 值：

1）轴心受压时

$$P = P_0 \tag{9-200}$$

2）偏心受压时

$$P=\frac{P_{max}+P_c}{2} \text{ 或 } P=\frac{P_{max}+P_c'}{2} \qquad (9\text{-}201)$$

式中 P_0、P_{max}、P_c、P_c' 如图 9-42 所示。

表 9-46　P_0 值　kPa

$\Delta h/\Delta b$ 或 $\Delta h_1/\Delta b_1$	混凝土强度等级
	C20 级
1.0	160
1.2	220
1.4	280
1.6	350
1.8	410

注　当混凝土基础底板强度等级不为 C20 时，P_0 可按下式计算。

$$P_0=\frac{\tan\delta-\delta}{\delta}(0.55f_t)$$

式中：$\tan\delta$ 为底板变阶高宽比，即 $\tan\delta=\frac{\Delta h_1}{Vb_1}$，$\delta$ 以弧度计，其值 $\delta=\arctan(\tan\delta)$，rad。

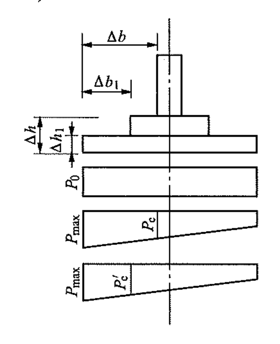


图 9-42　底板下压时承载力计算简图

（2）底板在上拔荷载作用时（见图 9-43），其截面的剪切承载力（1-1 或 2-2）应符合式（9-202）要求。

$$V\leqslant 0.4b_0h_xf_t \qquad (9\text{-}202)$$

式中 V——计算截面上的剪力设计值，kN；

$$V_1=\frac{P_{max}+P_{c1}}{2}A_{c1} \qquad (1\text{-}1 \text{ 截面})$$

$$V_2=\frac{P_{max}+P_c}{2}A_{c2} \qquad (2\text{-}2 \text{ 截面})$$

$$b_0=l \qquad (1\text{-}1 \text{ 截面})$$

$$b_0=l-2\Delta b_1 \qquad (2\text{-}2 \text{ 截面})$$

h_x——截面的高度，m，1-1 截面取 $h_x=\Delta h_1$，2-2 截面可取 $h_x=\Delta h$；

A_{c1}、A_{c2}——图 9-43 阴影面积，m²。

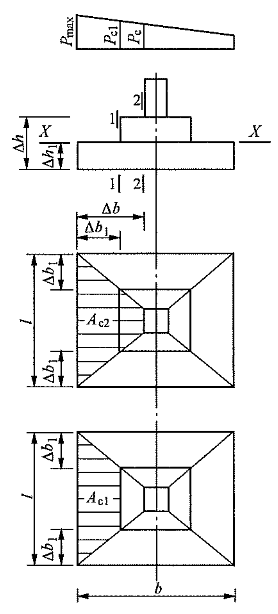


图 9-43　底板上拔时承载力计算简图

三、石材基础

在电杆基础的底盘、拉线盘和卡盘的设计中，可用石材代替钢筋混凝土的底盘、拉盘和卡盘基础。石材的选择应以深层的花岗岩等火成岩为理想。凡有风化现象以及层理明显的岩石不宜使用。选用石材的力学特性，以极限抗压强度 f_{s0} 不小于 130MN/m² 和软化系数 K_d 不小于 0.75 为准。

（一）正截面强度计算

石材的底盘、拉线盘和卡盘（简称三盘），一般均为矩形截面，根据设计经验其正截面强度可按下式计算。

$$\gamma_{sc}M\leqslant R_yW_0\gamma_1 \qquad (9\text{-}203)$$

式中 γ_{sc}——石材的强度设计附加系数，按表 9-47 取值；

M——计算截面的弯矩，kN·m；

R_y——石材的极限抗弯强度，宜由试验确定，但不应小于 7MN/m²；

W_0、γ_1——与式（9-199）意义相同。

表 9-47　石材的强度设计附加系数 γ_{sc}

种类	γ_{sc}
底盘	2.2
拉线盘	3.7
卡盘	3.0

（二）石材底盘、拉线盘和卡盘的加工要求

（1）底、拉盘边缘至中心线的距离容许误差±10mm，厚度误差 10mm。

（2）底盘的下平面其凹凸不平度不大于10mm。

（3）底盘上平面圆形槽底的凹凸不平度不大于5mm，圆槽中心与底盘中心误差不大于10mm，圆槽直径误差±10mm。

（4）卡盘尺寸的容许误差：长度±20mm；宽度和厚度±10mm。

（5）卡盘侧面的弧形槽，弧径±5mm，凹凸不平度不大于3mm，弧形槽的立面应与上下平面成直角。

（6）卡盘侧面固定螺栓处应有100mm×100mm的平整面，并应与螺栓孔垂直，其不平整度不大于5mm。

（7）孔位至构件中心线误差不大于5mm，钻孔边缘脱落度不大于10mm，孔径不大于1.5倍设计孔径。

（8）各构件除特殊要求外，各表面凹凸不平度不大于20mm。

（三）石材底盘、拉线盘和卡盘的常用规格

石材底盘、拉线盘和卡盘的常用规格如表9-48～表9-50所列。

表9-48　底盘常用规格

型号	构件尺寸（m）		质量（kg）	容许轴心压力（kN）
	宽	厚		
0.6	0.6	0.16	140	208
0.8	0.8	0.18	280	263
1.0	1.0	0.22	530	393
1.2	1.2	0.24	830	468
1.4	1.4	0.25	1180	508

注　表中容许轴心压力系按构件强度的计算值。

表9-49　拉线盘常用规格

型号	构件尺寸（m）			D（m）	质量（kg）	U形螺栓质量（kg）	容许拉力（kN）
	l	b	h				
0.6	0.6	0.4	0.14	0.2	100	3.5	50.9
0.8	0.8	0.5	0.20	0.2	250	3.5	93.4
1.0	1.0	0.6	0.22	0.2	350	3.5	107.2
1.2	1.2	0.6	0.22	0.4	450	5.6	85.7
1.4	1.4	0.7	0.25	0.4	700	5.6	110.8
1.6	1.6	0.8	0.25	0.4	900	5.6	110.7

注　1. 表中容许拉力系按构件强度的计算值。
　　2. D为U形螺栓开口尺寸。

表9-50　卡盘常用规格

型号	构件尺寸（m）			杆径（m）	质量（kg）	抱箍质量（kg）	容许力（kN）
	长	高	宽				
0.8	0.8	0.3	0.25	0.45/0.53	170	4.6/5.1	95
1.0	1.0	0.3	0.25	0.45/0.53	210	4.6/5.1	76
1.2	1.2	0.4	0.25	0.45/0.53	340	4.6/5.1	84
1.4	1.4	0.4	0.30	0.45/0.53	470	4.6/5.1	104
1.6	1.6	0.4	0.30	0.45/0.53	540	4.6/5.1	91
1.8	1.8	0.4	0.30	0.45/0.53	700	4.6/5.1	81

四、地脚螺栓

（一）承载力计算

受上拔力作用的地脚螺栓，当与设计上拔力呈对称布置时，单根截面的有效面积应按下式计算

$$A_e = \frac{T_E}{nf_g} \tag{9-204}$$

式中　A_e——地脚螺栓的有效面积，mm^2，可按表9-51取用；
T_E——上拔力设计值，N；
n——根数；
f_g——地脚螺栓抗拉强度设计值，N/mm^2，按表9-52确定。

表9-51　地脚螺栓有效面积表

地脚螺栓规格	M22	M24	M27	M30	M33	M36	M39	M42
有效面积A_e（mm^2）	303	353	459	561	694	817	976	1121
地脚螺栓规格	M48	M52	M56	M60	M64	M68	M72	M80
有效面积A_e（mm^2）	1473	1758	2030	2362	2676	3055	3460	4344

表9-52　地脚螺栓的强度设计值　N/mm^2

种类	抗拉强度设计值f_g
Q235	160
Q345	205
35号优质碳素钢	190
45号优质碳素钢	215
40Cr合金钢	260
42CrMo合金钢	310

注　45号优质碳素钢因易断、焊接困难等原因，应慎用，当采用时，应采取相应的热处理措施；40Cr、42CrMo材质的地脚螺栓需进行调质处理，调质热处理后的材料机械性能应满足GB/T 3077—1999《合金钢结构》的要求，禁止焊接、热弯。

（二）锚固措施

当地脚螺栓净间距不小于 4d（地脚螺栓净间距不宜小于 4d 时，当小于 4d 时，应考虑群锚效应的不利影响）时，考虑充分利用地脚螺栓的抗拉强度，地脚螺栓锚入混凝土的最小锚固长度应按下式计算

$$l_a = 0.7\zeta_a \alpha \frac{f_g}{f_t} d \tag{9-205}$$

式中 ζ_a——考虑地震影响的修正系数，抗震等级为四级或非抗震时取 1.00，抗震等级为三级时取 1.05，抗震等级为一、二级时取 1.15；

α——外形系数，按光圆钢筋取 0.16；

f_t——混凝土轴心抗拉强度设计值，N /mm²，当混凝土强度等级高于 C60 时，按 C60 取值；

f_g——地脚螺栓抗拉强度设计值，N/mm²，按表 9-52 确定；

d——地脚螺栓的直径，m。

式（9-205）中系数 0.7 是考虑地脚螺栓末端采用弯钩或机械锚固措施时，包括弯钩或锚固端头在内的锚固长度（投影长度）可取为基本锚固长度的 70%。对于地脚螺栓末端弯钩或机械锚固措施的选择，当螺栓直径 d=22～48mm 时，宜采用弯钩式（L 型或 J 型），当螺栓直径 d>48 时，宜采用锚板式（T 型）、双头螺母型或棘爪型，各种型式如图 9-44 所示。常见的地脚螺栓选择表见表 9-53。

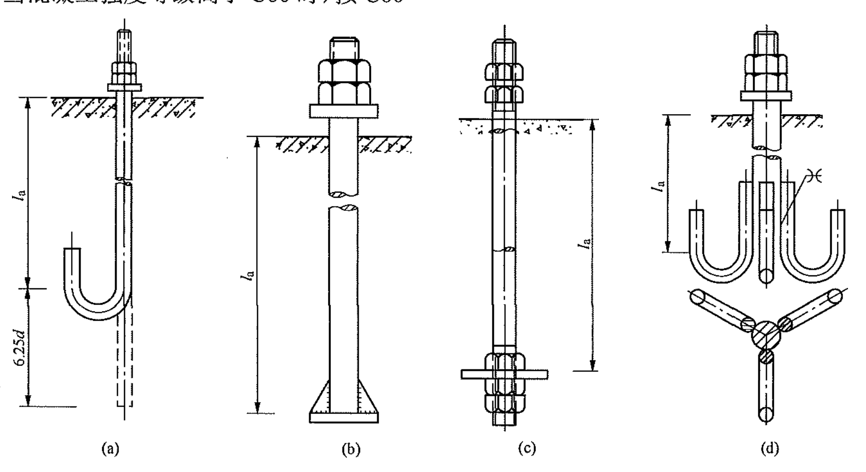


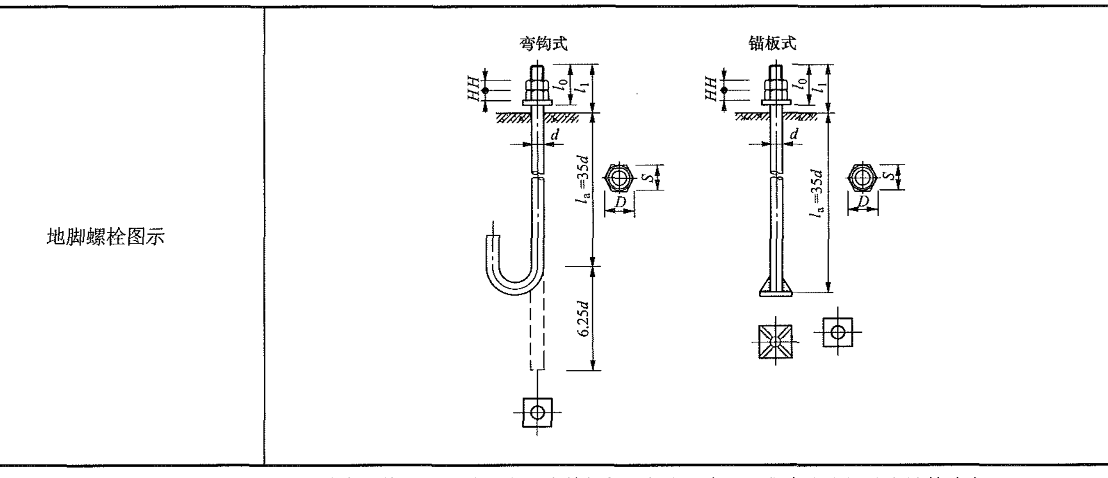
图 9-44 地脚螺栓常见的锚固型式

（a）弯钩式 L 型；（b）锚板式 T 型；（c）双头螺母型；（d）棘爪型

表 9-53 常见地脚螺栓选择表

	螺栓直径 d（mm）	22	24	27	30	36	42	48	56	64
	有效面积（cm²）	3.03	3.53	4.59	5.61	8.17	11.21	14.73	20.30	26.76
螺杆	有丝扣部分 l_0	80	80	90	100	100	120	135	150	160
	露出基础面部分 l_1	100	100	110	120	130	150	170	190	200
	锚固长度（l_a）	770	840	945	1050	1260	1470	1680	1960	2240
	钩长（mm）	140	150	170	190	205				
	总长（mm）	1010	1090	1225	1360	1595	1620	1850	2150	2440
	杆质量（kg）	3.01	3.87	5.50	7.54	12.74	19.02	28.48	44.37	65.45
	锚板质量（kg）						4.4	5.8	7.4	9.4
螺 帽	H（mm）	18	19	22	24	28	32	38	45	50
	D（mm）	36.9	41.6	47.3	53.1	63.5	75.0	86.5	93.0	104.0
	S（mm）	32	36	41	46	55	65	75	80	90
	质量（kg）	0.074	0.105	0.158	0.221	0.365	0.591	0.946	1.260	1.740

续表

地脚螺栓图示	

注 表中锚固长度 l_a 适用于45号优质碳素钢的C25及其以上强度等级的混凝土，实际工程中应由设计者计算确定。

五、基础构造要求

（一）混凝土强度等级

（1）基础采用的混凝土强度等级不应低于C20；

（2）当采用强度等级为400MPa及以上的钢筋时，混凝土强度等级不应低于C25，采用预制钢筋混凝土结构件时，不应低于C30。

（二）钢筋接头

（1）纵向钢筋宜优先采用机械连接接头或焊接接头，机械连接可采用直螺纹或挤压套筒，焊接可采用闪光对焊、电弧焊、电渣压力焊或气压焊。当钢筋直径小于等于14mm时采用绑扎搭接，当钢筋直径大于14mm时优先选用机械连接，可选用焊接，机械连接采用二级的质量等级，筏板钢筋选用机械连接。钢筋机械连接应符合现行标准JGJ 107—2016《钢筋机械连接技术规程》的有关规定。

钢筋焊接的接头形式、焊接工艺、质量验收应符合现行标准JGJ 18—2012《钢筋焊接及验收规程》的有关规定。采用气压焊时施工技术条件及质量要求应符合现行标准JG/T 94—2013《钢筋气压焊机》。钢筋焊接接头的实验方法应符合现行标准JGJ/T 27—2014《钢筋焊接接头试验方法标准》的有关规定。

（2）绑扎骨架和绑扎钢筋网的受力钢筋，当接头用搭接而不加焊时，其搭接长度 l_l 不应小于式（9-206）的规定。但当受力钢筋直径 d>25mm时，不宜采用非焊接的搭接接头；而对轴心受压和偏心受压基柱，当钢筋直径 d≤28mm时，可采用非焊接的搭接接头，但接头位置宜设置在受力较小处。

轴心受拉及小偏心受拉构件不得采用非焊接的搭接接头。

双面配置受力钢筋的焊接骨架，不得采用非焊接的搭接接头。

（3）受力钢筋接头的位置应相互错开，在任一搭接长度 l_d 的区段内，有钢筋接头的受力钢筋截面面积占受力钢筋总截面面积的百分率μ：

1）受力钢筋的焊接接头，受拉区μ不大于50%，受压区不限制；

2）焊接骨架和焊接钢筋网的搭接接头μ不大于50%；

3）绑扎骨架和绑扎钢筋网中钢筋的搭接接头，受拉区μ不大于25%，受压区μ不大于50%。

（4）纵向受拉钢筋绑扎搭接接头的搭接长度，应根据位于同一连接区段内的钢筋搭接接头面积百分率按下式计算，且不应小于300mm。

$$l_l=\zeta_l l_a \tag{9-206}$$

式中 l_l ——纵向受拉钢筋的搭接长度；

l_a ——受拉钢筋的锚固长度，详见式（9-207）；

ζ_l ——纵向受拉钢筋搭接长度修正系数，按表9-54取用。当纵向搭接接头面积百分率为表中的中间值时，修正系数可按内插取值。

表9-54 绑扎受力钢筋的最小搭接长度修正系数

纵向搭接钢筋接头面积百分率（%）	≤25	50	100
ζ_l	1.2	1.4	1.6

（三）钢筋锚固

（1）当计算中充分利用钢筋的抗拉强度时，普通钢筋受拉钢筋的锚固长度应满足式（9-207）的要求：

$$l_a=\alpha\frac{f_y}{f_t}d\gamma_1 \tag{9-207}$$

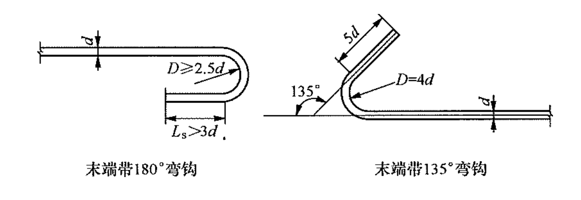
式中 l_a——受拉钢筋的锚固长度，其钢筋锚固端应采取可靠的锚固措施（见图 9-45），当受拉钢筋为 HRB335 级、Q345 级、HRB400 级、HRB500 级，末端采用机械锚固措施时，包括附加锚固端头在内的锚固长度可取 $0.7l_a$，此时，锚固长度范围内的箍筋应不少于 3 个，箍筋直径应大于纵向钢筋直径的 0.25 倍，其间距应小于纵向钢筋直径的 5 倍；

f_t——混凝土轴心抗拉强度设计值，N/mm²；

d——钢筋的公称直径，mm；

γ_1——锚固长度修正系数，一般取 1.0，当钢筋直径大于 25mm、或当钢筋在混凝土施工过程中易受扰动时，取 1.1；

α——钢筋的外形系数，光圆钢筋取 0.16，带肋钢筋取 0.14。



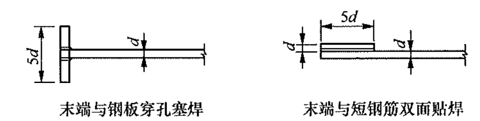


图 9-45 钢筋末端锚固示意图

在支座锚固处的纵向受拉钢筋，如计算中充分利用其强度时，则伸入支座内的锚固长度 l_a 不应小于式（9-207）的计算值。

（2）纵向受拉钢筋不宜在受拉区截断，如必须截断时，应伸至按计算不需要该钢筋的截面以外，其伸出的锚固长度 l_a 不应小于式（9-207）的计算值。

（3）纵向受压钢筋在跨中截断时，必须伸至按计算不需要该钢筋的截面以外，其伸出的锚固长度 l_a 不小于 $15d$；但对绑扎骨架中末端无弯钩的光面钢筋，l_a 不小于 $20d$。

（4）绑扎骨架中的受力钢筋，应在末端弯钩，但在下列钢筋的末端可不做弯钩：

1）螺纹钢筋；

2）焊接骨架和焊接钢筋网中的光面钢筋；

3）绑扎骨架中的受压光面钢筋：在轴心受压构件中的任意直径的钢筋；在其他构件中的直径 $d\leqslant$ 12mm 的钢筋。

（四）纵向受力钢筋的最小配筋百分率

钢筋混凝土构件中纵向受力钢筋的配筋百分率，不应小于表 9-55 规定的最小配筋百分率。

表 9-55 纵向受力钢筋的最小配筋百分率

类 型			最小配筋百分率
受压构件	全部纵向钢筋	强度等级 500MPa	0.50
		强度等级 400MPa	0.55
		强度等级 300MPa、335MPa	0.60
	一侧纵向钢筋		0.20
受弯构件、偏心受拉构件、轴心受拉构件一侧的受拉钢筋			0.20 和 $45f_t/f_y$ 中较大者

注 1. 受压构件的全部纵向钢筋和一侧纵向钢筋的配筋率以及轴心受拉构件和小偏心受拉构件一侧受拉钢筋的配筋率均应按构件的全截面面积计算。
2. 偏心受拉构件中的受压钢筋应按受压构件一侧纵向钢筋考虑。
3. 当钢筋沿构件截面周边布置时，一侧纵向钢筋系指沿受力方向两个对边中一边布置的纵向钢筋。

基础底板受力钢筋最小配筋率不应小于 0.15%，最小直径不应小于 10mm，间距不应大于 200mm，也不应小于 100mm。

（五）基柱

（1）基柱截面。有方形、矩形（$l/b\leqslant2$）、圆形和环形截面，其中以方形为主。现场浇制的方形混凝土及钢筋混凝土基柱的截面，一般不小于 400mm×400mm；工厂预制的钢筋混凝土基柱的截面不小于 150mm×150mm。

（2）纵向受力钢筋。基柱中纵向受力钢筋应符合下列要求：

1）受压构件的纵向受力钢筋直径 d 不宜小于 12mm，全部纵向钢筋配筋率不宜超过 5%。

2）在偏心受压柱中，垂直于弯矩作用平面的侧面上的纵向受力钢筋以及轴心受压柱中各边的纵向受力钢筋，其中距不应大于 300mm。当偏心受压基柱的截面高度 $h\geqslant$600mm 时，在侧面应设置直径 d=10～16mm 的纵向构造钢筋，并相应的设置附加箍筋。

3）柱内纵向钢筋的净距不应小于 50mm，且不宜大于 300mm。

4）圆形和环形截面的中纵向钢筋宜沿周边均匀布置，根数不宜少于 8 根，且不应少于 6 根。

5）纵向受力钢筋的焊接接头应相互错开，并应满足规定：同一连接区段的长度为 $35d$（d 为纵向受力钢筋的较小直径）且不小于 500mm。在同一连接区段内，纵向受拉钢筋的焊接接头面积百分率不宜大于

50%。纵向受压钢筋的接头百分率可不受限制。

（3）纵向受力钢筋的混凝土保护层厚度应符合表 9-56 规定的数值。

表 9-56 钢筋的混凝土保护层最小厚度 mm

构件类别	钢筋类别	保护层最小厚度
现浇基础的柱、梁	纵向受力钢筋	≥40
有垫层的现浇基础底板	纵向受力钢筋	≥40
无垫层的现浇基础底板	纵向受力钢筋	≥70
混凝土强度等级不低于C20 级的预制基础	纵向受力钢筋	≥30
现浇基础的柱、梁	箍筋和构造钢筋	≥15

注 1. 对要求使用年限较长，或受沿海环境侵蚀的混凝土结构，其钢筋保护层厚度应适当增加。
2. 对有特殊要求的结构，其保护层厚度另行确定。
3. 离心制造的环形构件取δ不小于 15mm。

（4）基柱中的箍筋应符合下列要求：

1）基柱和其他受力构件中箍筋应做成封闭式。

2）箍筋的间距 s 不大于 400mm（预制构件不大于 300mm），且 s 不大于 b（基柱截面的短边宽度）；s 不大于 $15d$（纵向钢筋的最小直径），取三者中的小值且以 10mm 为模数。

3）箍筋直径 d_{pr} 不小于 $d/4$（d 为纵向受压钢筋的最大直径），且 d_{pr} 不小于 6mm，当柱的宽度不小于 800mm 时，箍筋直径不应小于 8mm。

4）受压基柱纵向受力钢筋配筋百分率μ>3%时，箍筋直径 d_{pr} 应不小于 $d/4$ 且不小于 8mm，且应焊成封闭环式。箍筋间距 s 不大于 $10d$（纵向钢筋的最小直径），且 s 不大于 200mm。搭接长度应满足最小锚固长度，箍筋末端应做成 135°弯钩且弯钩末端平直段长度不应小于纵向受力钢筋最小直径的 10 倍。箍筋也可焊成封闭环式。

5）当矩形截面基柱（轴心或偏心受压构件）各边纵向钢筋多于 3 根（或基柱矩边 b 不大于 400mm，纵向钢筋多于 4 根）时，应设置附加箍筋（图 9-46），在箍筋的转弯间隔内只容许有一根纵向钢筋不设在箍筋的转弯处。

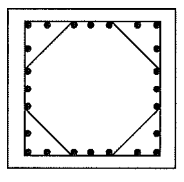
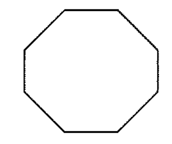



图 9-46 附加箍筋示意图

6）有水平力作用的受弯基柱，其箍筋的配置尚应符合梁中由剪力要求的箍筋最大间距和最小体积配箍率的要求。

7）柱中纵向受力钢筋搭接长度范围内应配置箍筋，其直径不应小于搭接钢筋较大直径的 0.25 倍。当钢筋受拉时，箍筋间距不应大于搭接钢筋较小直径的 5 倍，且不应大于 100mm；当钢筋受压时，箍筋间距不应大于搭接钢筋较小直径的 10 倍，且不应大于 200mm。当受压钢筋直径 d>25mm 时，尚应在搭接接头两端面外 100mm 范围内各设置两个箍筋。

六、基础材料

（一）混凝土

混凝土的强度等级是设计上一项重要的力学特性，在设计混凝土或钢筋混凝土构件时，必须首先确定混凝土的强度等级。混凝土强度等级系指按照标准方法制作、养护的边长为 150mm 的立方体试件，在 28 天龄期，用标准试验方法测得的具有 95%保证率的立方体抗压强度标准值（以 N/mm^2 表示）。

在计算混凝土和钢筋混凝土基础的截面强度和刚度时，尚需具有混凝土的强度和弹性模量。表 9-57 列出混凝土强度等级及其设计强度、弹性模量的关系作为设计的依据。

表 9-57 混凝土的设计强度和弹性模量 N/mm^2

强度种类	符号	混凝土强度等级						
		C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50
轴心抗压强度设计值	f_c	9.6	11.9	14.3	16.7	19.1	21.1	23.1
轴心抗压强度标准值	f_{ck}	13.4	16.7	20.1	23.4	26.8	29.6	32.4
轴心抗拉强度设计值	f_t	1.10	1.27	1.43	1.57	1.71	1.80	1.89
轴心抗拉强度标准值	f_{tk}	1.54	1.78	2.01	2.20	2.39	2.51	2.64
受压、受拉弹性模量	E_c（$\times 10^4 N/mm^2$）	2.55	2.80	3.00	3.15	3.25	3.35	3.45

（二）钢筋

输电线路采用的钢筋混凝土基础，由于耐久性和抗拔承载能力的限制，其截面尺寸均较大，计算所需的钢筋截面面积较小，通常采用 HPB300、HRB400 钢筋就足以满足设计要求。

计算钢筋混凝土基础的截面强度时，普通钢筋强度设计值和弹性模量应按表 9-58 取值。

表 9-58 普通钢筋强度设计值和弹性模量 N/mm²

种类		符号	公称直径 d（mm）	抗拉强度设计值 f_y	抗压强度设计值 f_y'	屈服强度设计值 f_{yk}	极限强度设计值 f_{stk}	弹性模量 E_s	抗剪强度 $f_τ$
热轧钢筋	HPB300	Φ	6～22	270	270	300	420	2.1×10^5	115
	HRB335 HRBF335	Φ，Φ^F	6～50	300	300	335	455	2.0×10^5	155
	HRB400 HRBF400 RRB400	Φ，Φ^F，Φ^R	6～50	360	360	400	540	2.0×10^5	180
	HRB500 HRBF500	Φ，Φ^F	6～50	435	435	500	630	2.0×10^5	195

（三）石材

石材是一种具有良好力学性能的天然材料，如能就近取材将会降低基础工程的造价。石材已广泛地用作电杆的底盘、拉线盘和卡盘等基础。石材用于三盘基础时一般应考虑抗压强度和抗水性的要求，对处在特殊环境中的三盘（如高温、高湿、水中、严寒侵蚀等），应分别考虑石材的耐久性、耐水性、抗冻性及耐化学腐蚀等是否满足要求。一般架空输电线路中的石材三盘选用未风化材质均匀的火成岩石，软化系数不小于 0.75 以满足耐水性的要求。石材强度等级分为 M20、M30、M40、M50、M60、M80、M100。石材的抗压强度等级是在石材饱水状态下，取三个边长为 70mm 的立方体试块，求得抗压强度的平均值，以此作为评定石材标号的等级的标准。

第五节 桩 基 础

本节介绍架空输电线路工程中最常用的桩基础类型及其设计方法的主要内容，按岩石锚桩基础、钻孔灌注桩基础、挖孔灌注桩（挖孔桩）基础及单桩的静载试验要点等方面进行介绍。

一、岩石锚桩基础

（一）使用原则

岩石锚桩基础主要是把锚筋直接锚固于灌浆的岩石孔内，通过岩石本身、岩石与砂浆间和砂浆与锚筋的黏结力来抵抗上部杆塔结构传来的荷载，以保证基础结构的稳定，岩石锚桩基础属于原状土基础类型。

随着试验和实践经验的积累，岩石锚桩基础在工程中的使用范围不断扩大，即使风化程度比较严重的岩石，亦可用做岩石锚桩基础。

采用岩石锚桩基础时必须逐基鉴定岩体的稳定性、覆盖层厚度、岩石的坚固性及岩石风化程度等情况，以便针对不同条件做出相应型式的锚桩基础。施工开挖后，发现岩石风化程度与原地质资料不符时，应及时采取措施，因地制宜地做好修改方案。

（二）岩石分类和岩石锚桩基础的基本型式

1. 岩石分类

（1）按岩石的强度可划分为硬质和软质岩石两大类：

1）硬质岩石有花岗岩、花岗片麻岩、闪长岩、玄武岩、石灰岩、石英砂岩、石英岩、大理岩和硅质砾岩等；

2）软质岩石有页岩、黏土岩、千枚岩、绿泥石片岩和云母片岩等。

除上述代表性岩石外，凡新鲜岩石的饱和单轴抗压强度大于或等于 30MN/m² 的，可考虑为硬质岩石；小于 30MN/m² 的，为软质岩石。

（2）按岩石风化程度可划分为未风化、微风化、中等风化、强风化和全风化，其特征如表 9-59 所列。

表 9-59 岩石风化程度的划分

风化程度	特征	
	硬质岩石	软质岩石
未风化	岩质新鲜，未见风化痕迹	
微风化	组织结构基本未变，仅节理面有铁锰质渲染或矿物略有变色。有少量风化裂隙	

续表

风化程度	特征	
	硬质岩石	软质岩石
中等风化	（1）组织结构部分破坏，矿物成分未破坏，仅沿节理面出现次生矿物。 （2）岩体被节理、裂隙分割成块（200～500mm），裂隙中填充少量风化物，锤击声脆，且不易击碎。 （3）用镐难挖掘，用岩心钻方可钻进	（1）组织结构部分破坏，矿物成分发生变化，节理面附近的矿物已风化成土状。 （2）岩体被节理、裂隙分割成岩块（200～500mm），锤击易碎。 （3）用镐难挖掘，用岩心钻方可钻进
强风化	（1）组织结构已大部分破坏，矿物成分已显著变化，长石、云母已风化成次生矿物。 （2）岩体被节理、裂隙分割成碎石状（20～200mm），碎石用手可以折断。 （3）用镐可挖掘，手摇钻不易钻进	（1）组织结构已大部分破坏，矿物成分已显著变化，含大量黏土质黏土矿物，风化裂隙很发育。 （2）岩体被切割成碎块，干时可用手折断或捏碎，浸水或干湿交替时可较迅速地软化或崩解。 （3）用镐可以挖掘，干钻可钻进
全风化	（1）组织结构已基本破坏，但尚可辨认，且有微弱的残余结构强度。 （2）可用镐挖，干钻可钻进	（1）组织结构已基本破坏，但尚可辨认，且有微弱的残余结构强度。 （2）可用镐挖，干钻可钻进

注　只要具备本表特征之一，就可以认为属该类风化。

2. 岩石锚桩基础的基本型式

岩石锚桩基础的常用型式可分为直锚式、承台式、嵌固式和斜锚式。嵌固式岩石锚桩常见的有坡面和直掏两种形式（见图 9-47）。

（1）直锚式锚桩：系以地脚螺栓作为锚筋直接锚入岩石，因地脚螺栓作为锚筋，故仅能适用于覆盖层较薄的硬质未风化或微风化的岩石中。一般采用机械钻孔，用高标号水泥砂浆或细石混凝土与地脚螺栓形成锚桩，顶部浇以不小于塔脚底板的混凝土承台，承台的厚度宜尽量减薄。

（2）承台式锚桩：系通过钢筋混凝土承台将锚桩与地脚螺栓连接成整体，适用于覆盖层较厚的硬质中等风化岩石和软质微风化岩石，在强风化岩石中采用须慎重。锚桩用砂浆或细石混凝土锚固，承台用钢筋混凝土浇成。

（3）嵌固式锚桩基础：图 9-47（c）中左图为坡面形式，系将地脚螺栓直接浇注在坡度 1/6～1/8 的混凝土墩内，一般不配筋；图 9-47（c）中右图为直掏挖形式，常用于山区高露头基础，需要配筋。该型基础适用强风化的岩石条件，采用人工掏挖时要防止岩石振动。

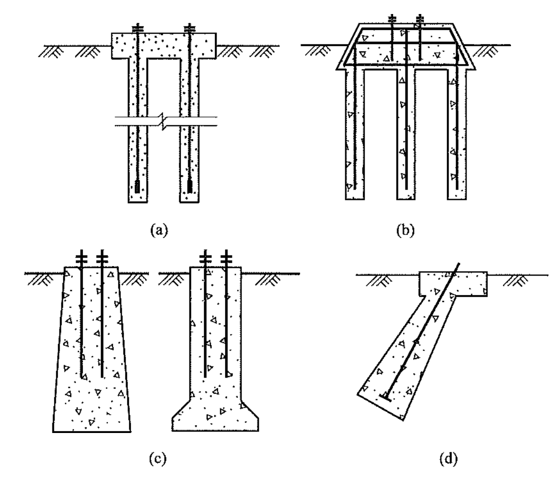


图 9-47　岩石锚桩基础的基本型式

（a）直锚式锚桩；（b）承台式锚桩；（c）嵌固式锚桩；（d）斜锚式

上述三类岩石基础型式，为常用的基础型式。当采用时应结合具体塔位的岩石情况，尤其在施工开挖后应逐基复查，以使设计的岩石锚桩基础安全、合理。

（三）岩石锚桩基础承载力计算

岩石地基耐压强度高，其承载力一般由抗拔强度控制。岩石锚桩基础承载力计算一般包括：地脚螺栓或锚筋的强度；地脚螺栓或锚筋与砂浆或细石混凝土间的粘结强度；锚桩与岩石间的黏结强度；岩石本身的剪切强度。

1. 锚筋的抗拉承载力

单根锚筋或地脚螺栓的截面面积可按下式计算

$$T_i \leqslant f_y A_n \tag{9-208}$$

式中　T_i——单根锚筋上拔力设计值，kN；

A_n——单根锚筋的净截面面积；当锚筋为地脚螺栓时，应取有效面积 A_e，m^2；

f_y——锚筋的抗拉强度设计值；当锚筋为地脚螺栓时，强度设计值应为 f_g，kPa。

2. 单根锚筋或地脚螺栓与砂浆或细石混凝土间的黏结承载力计算

单根锚筋或地脚螺栓与砂浆或细石混凝土间的黏结强度应符合下式要求

$$\gamma_f T_i \leqslant \pi d l_a \tau_a \tag{9-209}$$

$$l_a = \min(h_0,\ l_a')$$

式中　γ_f——基础附加分项系数，直线塔取 1.1，直线耐张及悬垂转角塔取 1.3，转角、终端、大跨越塔取 1.6；

d ——锚筋或地脚螺栓的直径，m；

l_a ——锚筋在砂浆或细石混凝土内的有效锚固长度，m；

τ_a ——钢筋与砂浆或细石混凝土间的黏结强度，C30 级砂浆或细石混凝土取3000kPa；

h_0 ——锚桩深度，直锚式取钻孔深度，承台式取承台底至孔底的长度，m；

l'_a ——锚筋在砂浆或细石混凝土内的最大传力范围，未风化或微风化岩石取 25d，中等风化岩石取 35d，强风化岩石取 45d，m。

3. 锚桩与岩石间的黏结承载力

单根锚桩与岩石间的黏结强度应符合下式要求

$$\gamma_f T_i \leqslant \pi D l_b \tau_b \tag{9-210}$$

$$l_b = \min(h_0,\ l'_b) \tag{9-211}$$

式中 D ——锚桩直径，m；

τ_b ——砂浆或细石混凝土与岩石间的黏结强度，kN/m^2，可按表 9-60 取值；

l_b ——锚桩的有效锚固深度，m，取锚桩深度和锚桩在岩体内的最大传力范围的较小值；

l'_b ——锚桩在岩体内的最大传力范围，未风化或微风化岩石取 25D，中等风化岩石取 35D，强风化岩石取 45D，m。

表 9-60 砂浆或细石混凝土与岩石间的黏结强度 τ_b kN/m^2

岩石类别	未风化和微风化	中等风化	强风化
硬质岩石	700～1500	500～700	300～500
软质岩石	400～600	200～400	100～200

注 表中系指 C30 强度等级砂浆或细石混凝土与岩石间的黏结强度。

4. 岩石的抗剪承载力

岩石的剪切强度（见图 9-48），按虚线所示倒锥体作为假想的破坏面，以均匀分布于倒锥体表面的等代极限剪切应力 τ_s 的垂直分量之和来抵抗上拔力。

（1）单根锚桩[图 9-48（a）]和拉线基础[图 9-48（e）]应符合下式要求。

$$\gamma_f T_E \leqslant \pi h_0 \tau_s (D + h_0) \tag{9-212}$$

式中 T_E ——作用于锚桩的上拔力设计值，kN；

h_0 ——锚桩的锚固深度，m，单根锚桩 $h_0 = h$；

τ_s ——岩石等代剪切强度特征值（kPa），当无试验资料时，可参照表 9-61 采用；

D ——单根锚桩［图 9-48（a）]，和拉线基础［图 9-48（e）］的底径，m。

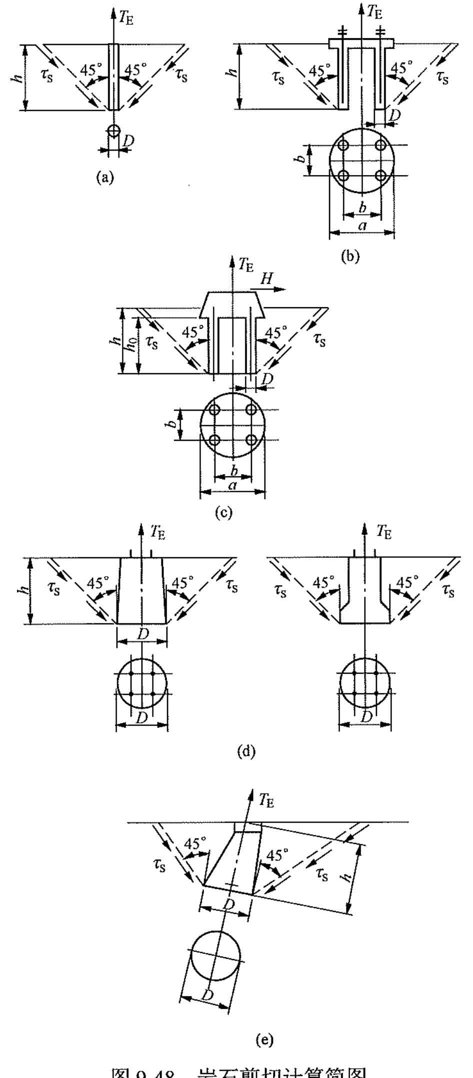


图 9-48 岩石剪切计算简图

（a）单根锚桩；（b）直锚式群锚桩；（c）承台式群锚桩；（d）嵌固式锚桩；（e）拉线基础

（2）嵌固式锚桩[图 9-48（d）]应符合式（9-213）。

$$\gamma_f T_E \leqslant \pi h_0 \tau_s (D + h_0) + G_f \tag{9-213}$$

D ——嵌固式锚桩［图 9-48（d）］的底径，m；

G_f ——嵌固式或承台式基础自重，kN。

（3）多根桩组成的群锚桩：在微风化岩石中，桩间距 b 大于 4 倍桩径 D 时和在中等风化至强风化岩石中，间距 b 大于 6～8 倍桩径 D 时，或者当桩间距 b 大于三分之一锚桩有效锚固深度 h_0 时，应符合式（9-212）的要求；当桩间距不符合上述条件时，除应符合式（9-212）的要求外，尚应符合式（9-214）的要求。

$$\gamma_f T_E \leqslant \pi h_0 \tau_s (a + h_0) + G_f \tag{9-214}$$

式中 a ——群锚桩外切圆直径，m，见图 9-48（b）、

（c），当群锚桩为正方形布置时取 $a=\sqrt{2}b+D$；当群锚桩为圆形布置时取 $d=D_1+D$。

D_1 ——圆形布置时圆形轴线的直径，m。

b ——方形布置时的边长，m。

D ——锚桩直径，m。

表 9-61　岩石等代剪切强度特征值 τ_s　（kPa）

岩石类别	未风化和微风化	中等风化	强风化
硬质岩石	80～150	30～80	17～30
软质岩石	40～80	20～40	10～20

（四）群锚桩的单根桩上拔力 T_i 的计算

1. 直锚式群锚桩

如图 9-47（a）所示，直锚式群锚桩计算可忽略水平力的作用，当各锚桩与设计上拔力对称布置时，其单桩的上拔力可按下式计算。

$$T_i=T_E/n \tag{9-215}$$

2. 承台式群锚桩

如图 9-49 所示，承台式群锚桩与设计上拔力对称布置，其单桩的最大上拔力可按下式计算

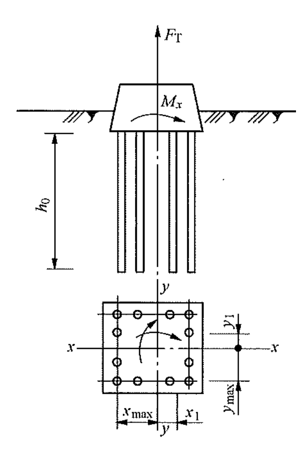


图 9-49　承台式群锚桩计算简图

$$T_i=\frac{T_E-G_f}{n}+\frac{M_x y_i}{\sum_i^n y_i^2}+\frac{M_y x_i}{\sum_i^n x_i^2} \tag{9-216}$$

式中　T_E ——作用于群锚桩顶部的设计上拔力，kN；

G_f ——桩基承台的自重力，kN；

n ——锚桩根数；

M_x、M_y ——作用于承台顶面上水平力对通过群锚重心的 X 轴和 Y 轴的力矩，kN·m；

x_i、y_i ——分别为第 i 根锚桩至群锚桩重心的 Y 轴和 X 轴的距离，m。

在实际工程中常对地脚螺栓设置偏心或承台基柱设置偏心以减小水平力对通过群锚重心的 X 轴和 Y 轴的力矩，从而减小单根锚桩所受到的上拔力 T_i。

（五）岩石锚桩基础的构造要求

（1）承台部分和地脚螺栓的构造，按本章第四节基础强度计算和构造设计。

（2）锚筋直径 d 不小于 16mm，根部必须设有可靠的锚固措施，一般采用帮条式、鱼尾式和焊螺帽式等加固端头措施。

（3）直锚式和承台式锚桩的地脚螺栓和锚筋，在基岩中的锚固深度 l_a 应符合下列要求：

微风化岩石 $l_a\geqslant 25d$；中等风化岩石 $l_a\geqslant 35d$；强风化岩石 $l_a\geqslant 45d$。

（4）钢筋在承台中的锚固长度 l_a 不宜小于式（9-207）的计算值，并带有锚固措施。

（5）锚孔直径 D：在硬质岩石中一般取 $D=(2.5\sim3.0)d$，且不得小于 $2d$（d 为锚筋或地脚螺栓直径），在软质岩石中应符合 $D=(2\sim3)d$，尚应符合 $d+50\text{mm}$ 的要求。钻孔施工应确保岩石完整性不受破坏，锚孔成型后应及时清孔，孔洞中的石粉、浮土及孔壁松散活石应清除干净。

（6）直锚式和承台式锚桩的最小孔距不应小于锚孔直径 D 的 3 倍，且不应小于 160mm。

（7）直锚式和承台式岩石基础填充用的水泥砂浆不低于 M30，细石混凝土强度等级不应低于 C30 级，嵌固式锚桩的混凝土强度等级不应低于 C25 级，锚孔灌浆前应将孔壁清理和冲洗干净，易风化的岩石，开孔至浇灌的间隙时间应尽量缩短。

细石混凝土浇筑前应进行二次清孔并对孔壁充分润湿，应尽量缩短开孔与灌注的时间间隔；细石混凝土的细石粒径宜为 5～8mm，宜采用中砂，应掺入水泥用量 3%～6%的膨胀剂或减水剂；细石混凝土应分层灌注并振捣密实，分层厚度宜控制在 0.3～0.5m。

（8）易风化的锚孔基岩表面应按照地区工程经验考虑风化的影响，必要时采取适当防风化措施。防风化措施保护范围可参考图 9-50。地表覆土层及全风化层的清理应以人工开挖为主。

二、钻孔灌注桩基础

（一）基本型式和适用条件

按桩的结构布置，钻孔灌注桩基础分为单桩和群桩。由小直径现场灌注钢筋混凝土桩和连接于桩顶的承台共同组成的群桩基础称为微型桩基础，当布置直桩和斜桩成网状结构时，又称为树根桩。微型桩的常见基础形式如图 9-51 中（a）～（c）所示。

按桩的承台位置或埋置特点，桩基础还可分为低桩和高桩基础，选用时应根据杆塔基础的设计荷载、水文和工程地质、施工工艺等条件确定。灌注桩基础常见形式如图 9-52 中（a）～（e）所示。

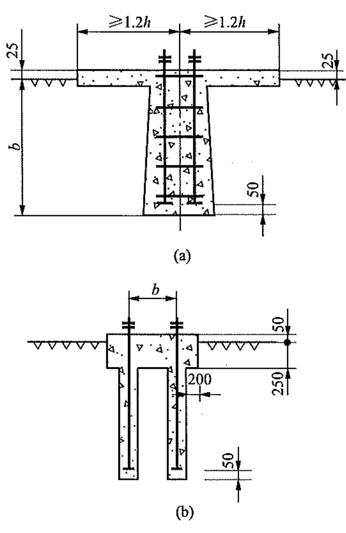


图 9-50　防风化措施保护范围简图

（a）强风化岩石；（b）微风化岩石

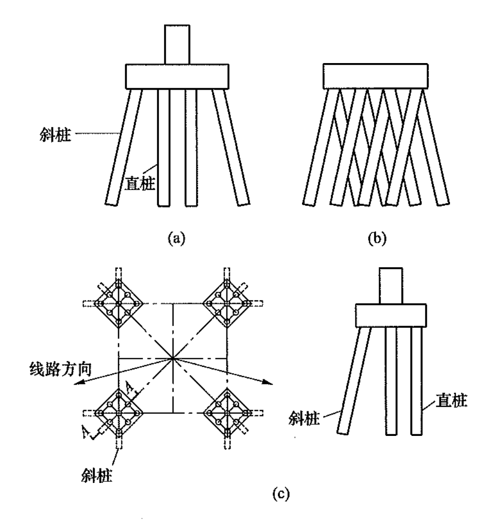


图 9-51　微型桩基础常见布置

1. 单桩基础

（1）低单桩：低单桩适用于地下水位高，易产生流沙现象的粉砂、细砂和软塑、流塑状态的黏性土地基，在洪水期间无漂浮物危害的河漫滩中的塔位均宜采用低单桩基础形式。

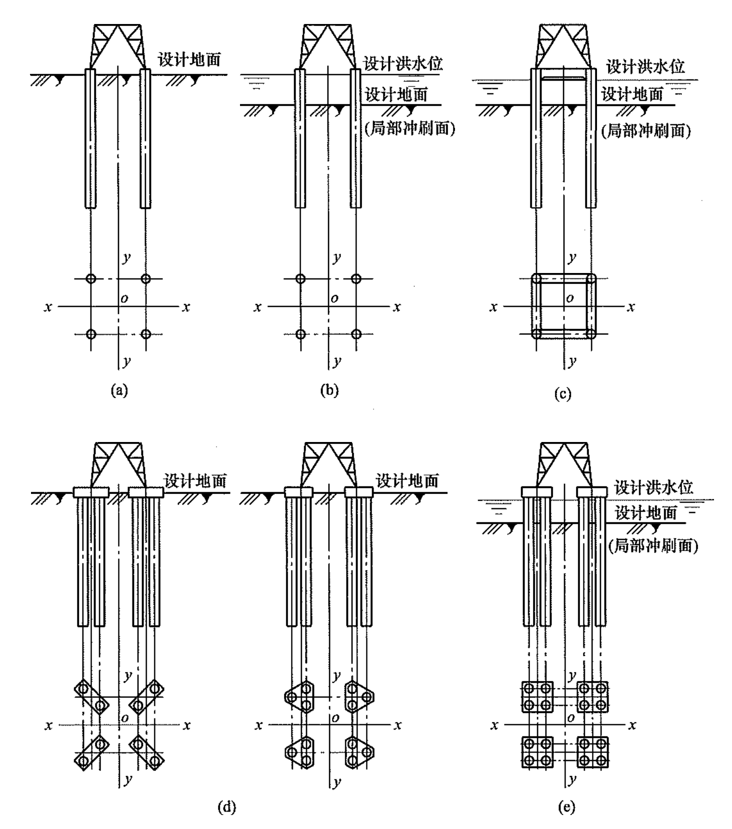


图 9-52　灌注桩基础常见外形

（a）低单桩；（b）高单桩；（c）高桩框架；（d）低桩承台；（e）高桩承台

（2）高单桩：高单桩适用的地质条件与低单桩相同。当设计洪水位高且有漂浮物危害的跨河段塔位，宜采用高单桩基础形式。

2. 群桩基础

杆塔基础除转角和终端塔外，一般均承受非定向的设计荷载，其横向荷载仅为竖向荷载的10%～20%。由于施工工艺条件的限制，在设计上宜选用对称的竖直群桩组成的桩基，根据塔位的水文条件选用低桩承台或高桩承台。

（1）低桩承台：当杆塔基础的设计荷载大，采用低单桩不能满足地基稳定或桩柱体强度要求以及施工工艺上有困难时，可采用低桩承台型式。根据桩基设计荷载的大小和工程地质条件等，桩数可分为双桩、四桩和多桩的桩基。

（2）高桩承台：当杆塔基础的设计荷载大，采用高单桩不能满足地基稳定或桩柱体强度要求以及施工工艺上有困难时，可采用高桩承台型式。根据桩基设计荷载的大小和工程地质条件等，桩数也可分为双桩、四桩和多桩的桩基。

（3）高桩框架：该型基础系把各塔腿的高单桩借助于桩顶部的横梁连成整体，可组成刚接的空间框架体系，也可组成铰接的空间梁柱体系。当按空间框架体系设计时，要求横梁有较大的相对线性刚度（EI/l），节点必须刚接，以起到分配桩柱固端的作用。当按梁柱体系设计时，要求横梁具有在拉腿侧向水平压力和自重力作用下的压弯承载能力。

（二）桩基的基本构造

除符合本章第四节基础构造的有关要求外，需符合下列要求：

1. 基桩

（1）基桩自设计地面起的入土深度不得小于6m，对冻胀土桩端进入标准冻结深度以下不小于4倍桩径，倾斜基桩的倾斜角度不宜大于15°。桩径宜取0.6～1.8m，微型桩的设计直径宜为0.2～0.4m，挖孔桩的设计直径不宜小于0.8m。灌注桩的中心间距不宜小于3.0倍桩径。扩底桩的中心间距，当扩大端设计直径D小于或等于2.0m时，中心间距应大于或等于1.5D；当扩大端设计直径D大于2.0m时，中心间距应大于或等于D+1.5。

（2）基桩的混凝土强度等级不应低于C25，混凝土材料及其强度等级应符合混凝土耐久性的要求。

（3）基桩的纵向钢筋应等截面或变截面通长配置，纵筋直径不宜小于12mm，同时也不宜大于28mm，根数不得少于8根。纵筋应沿基柱周边均匀布置，净距不应小于60mm，并尽量减少钢筋接头，在接头和截断处不宜设置弯钩。当桩身直径为300～2000mm时，最小配筋率不宜小于0.2%～0.65%（小直径桩取高值）。对于微型桩，桩身截面主筋不应小于3根，钢筋笼外径宜小于设计桩径40～60mm。

（4）纵向钢筋的混凝土保护层厚度不得小于50mm。

（5）箍筋应采用螺旋式，直径不应小于6mm，间距宜为200～300mm；桩顶以下5倍桩径范围及液化土层范围内的箍筋应加密，间距不应大于100mm；当钢筋笼长度超过4m时，应每隔2m设一道直径不小于12mm的焊接加劲箍筋。

（6）扩底灌注桩扩底端直径与桩身直径比D/d，应根据承载力要求及扩底端部侧面和桩端持力层土性特征以及扩底施工方法确定，挖孔桩的D/d不应大于3，钻孔桩的D/d不应大于2.5；扩底端侧面的斜率应根据实际成孔及土体自立条件确定，a/h_c可取1/4～1/2，砂土可取1/4，粉土、黏性土可取1/3～1/2。扩底端底面可为平底或锅底形，当为锅底形时，矢高h_b可取0.15～0.20D，如图9-53扩底桩构造示意图所示。

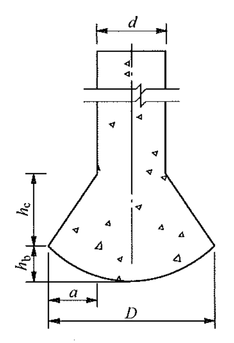


图9-53　扩底桩构造示意图

2. 承台

（1）承台的混凝土强度等级不应低于C25，混凝土材料及其强度等级应符合混凝土耐久性的要求。

（2）承台的纵向受力钢筋应通常配置，直径不应小于12mm，间距不应大于200mm，桩基承台的最小配筋率不应小于0.15%。对四桩及以上承台宜按双向均匀布置，对三桩的三角形承台应按三向板带均匀布置，且最里面的三根钢筋围成的三角形应在塔脚底板截面范围内。

（3）埋入土中的承台或连梁的埋深应大于或等于600mm。在季节性冻土及膨胀土地区，其埋深及处理措施，应按现行GB 5007—2011《建筑地基基础设计规范》和GB 50112—2013《膨胀土地区建筑技术规范》等有关规定执行。当计算中考虑承台侧向土抗力时，承台侧面应为原状土或经夯实能达到天然密实度的砂石类土。

（4）承台的厚度宜取为桩径的1.0～2.0倍，并应满足冲切承载力要求，且不应小于300mm。

（5）边桩外侧与承台边缘的距离，对直径不大于

1m 的桩不得小于桩径的 0.5 倍且不小于 250mm，对直径大于 1m 的桩不得小于桩径的 0.3 倍且不小于 500mm。

（6）承台底面钢筋的混凝土保护层厚度，当有混凝土垫层时，不应小于 50mm，无垫层时不应小于 70mm，尚不应小于桩头嵌入承台内的长度。

3. 连梁

（1）连梁的高度可取为桩径的 0.8～1.0 倍，宽度可取为桩径的 0.6～1.0 倍，且应有必要的抗弯刚度。当连梁用于承台与承台之间的连接时，连梁顶面宜与承台顶面位于同一标高。连梁宽度不宜小于 250mm，其高度可取承台中心距的 1/10～1/15，且不宜小于 400mm。

（2）连梁配筋应按计算确定，梁上下部配筋不宜小于 2 根直径 12mm 钢筋；位于同一轴线上的连梁纵筋宜通长配置。连梁主筋应伸入桩内并与桩内主筋可靠连接。

4. 基桩与承台的连接

（1）桩嵌入承台内的长度对中等直径桩不宜小于 50mm，对大直径桩不宜小于 100mm。

（2）桩顶纵向主筋锚入承台内的长度不宜小于纵向主筋直径的 35 倍，对于受拔桩基应满足受拉钢筋锚固长度的要求并不应小于纵向主筋直径的 40 倍。

（3）桩顶主筋宜外倾成喇叭形（大约与竖直线夹角为 15°），并应设置箍筋或螺旋筋，其直径与桩身箍筋直径相同，间距为 100～200mm。

5. 其他

存在液化土层的桩基，桩深入非液化土中的长度，应按计算确定，且对于碎石土、砾砂、粗砂、中砂、坚硬黏性土和密实粉土还不应小于 0.5m；对于其他非岩石土，同时不宜小于 1.5m。

（三）桩基主要计算内容和作用效应组合

1. 桩基主要计算内容

在灌注桩基础设计时，应根据具体情况进行下列项目计算：

（1）承受上拔力的单桩，应计算桩的抗拔稳定性，并使桩顶处的设计上拔力不大于单桩的容许上拔力。

（2）承受下压力的单桩，应计算桩的下压承载力，使桩顶处的设计下压力不大于单桩的容许下压力；还应做冻切力的上拔稳定计算。

（3）承受水平力和弯矩的单桩，应计算桩身的最大弯矩及其作用位置。应验算桩在设计地面处的水平变位。

（4）对于转角、终端杆塔，长期承受下压力作用的单桩，对沉降量有特殊要求时，应进行地基的沉降量验算，并使其不大于所要求的沉降量。

（5）桩身的正截面强度应按轴心受拉、偏心受拉或偏心受压构件计算。

（6）桩基除符合单桩要求的计算项目外，尚须验算桩基整体的地基承载力，并使其不大于地基容许承载力。

（7）桩基的板式承台应进行冲切、斜截面的抗剪、抗弯强度和正截面的抗弯强度的计算。

2. 桩基的作用效应组合

在桩基设计时，所采用的作用效应组合与相应的抗力应符合下列规定：

（1）在确定桩数和布桩时，应采用传至承台底面的荷载效应标准组合；相应的抗力应采用基桩或复合基桩承载力特征值。

（2）在计算荷载作用下的桩基沉降和水平位移时，应采用荷载效应准永久组合；计算水平地震作用、风载作用下的桩基水平位移时，应采用水平地震作用、风载效应标准组合。

（3）在验算坡地、岸边建筑桩基的整体稳定性时，应采用荷载效应标准组合；抗震设防区，应采用地震作用效应和荷载效应的标准组合。

（4）在计算桩基结构承载力、确定尺寸和配筋时，应采用传至承台顶面的荷载效应基本组合。当进行承台和桩身裂缝控制验算时，应分别采用荷载效应标准组合和荷载效应准永久组合。

（5）桩基结构设计安全等级、结构设计使用年限和结构重要性系数，应按现行有关建筑结构规范的规定采用，除临时性建筑外，重要性系数 γ_0 不应小于 1.0。

（6）当桩基结构进行抗震验算时，其承载力调整系数 γ_{RE} 应按现行 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》的规定执行。

（四）桩顶荷载效应的计算

（1）当水平力较小时，桩基中的基桩桩顶所受荷载效应，可按简化公式（9-217）～式（9-219）计算。

1）竖向力。轴心竖向力作用下

$$N_k = \frac{F_k + G_k}{n} \tag{9-217}$$

偏心竖向力作用下

$$N_{ik} = \frac{F_k + G_k}{n} \pm \frac{M_{xk} y_i}{\sum y_j^2} \pm \frac{M_{yk} x_i}{\sum x_j^2} \tag{9-218}$$

2）水平力。

$$H_{ik} = \frac{H_k}{n} \tag{9-219}$$

式中 F_k——荷载效应标准组合下，作用于承台顶面的竖向力，kN；

G_k ——桩基承台和承台上土自重标准值，对稳定的地下水位以下部分应扣除水的浮力，kN；

N_k ——荷载效应标准组合轴心竖向力作用下，基桩或复合基桩的平均竖向力，kN；

N_{ik} ——荷载效应标准组合偏心竖向力作用下，第 i 基桩或复合基桩的竖向力，kN；

M_{xk}、M_{yk} ——荷载效应标准组合下，作用于承台底面，绕通过桩群形心的 x、y 主轴的力矩，kN·m；

x_i、x_j、y_i、y_j ——第 i、j 基桩或复合基桩至 y、x 轴的距离，m；

H_k ——荷载效应标准组合下，作用于桩基承台底面的水平力，kN；

H_{ik} ——荷载效应标准组合下，作用于第 i 基桩或复合基桩的水平力，kN；

n ——桩基中的桩数。

（2）当水平力较大时，考虑承台、基桩和土的弹性抗力共同作用时，桩基中各基桩的桩顶作用效应、桩身内力和位移，可按本节“二、钻孔灌注桩基础（七）水平承载力和位移计算”中相关分析方法进行计算。

（五）桩下压承载力计算

1. 单桩竖向承载力特征值 R_a

单桩竖向承载力特征值按下式确定

$$R_a = \frac{1}{K} Q_{uk} \qquad (9\text{-}220)$$

式中 Q_{uk} ——单桩竖向极限承载力标准值，通过单桩静载试验或经验参数法计算得到，kN；

K ——安全系数，取 $K=2$。

2. 基桩竖向承载力特征值 R

对于端承型桩基、桩数少于 4 根的摩擦型柱下独立桩基或由于地层土性、使用条件等因素不宜考虑承台效应时，基桩竖向承载力特征值应取单桩竖向承载力特征值。

3. 复合基桩竖向承载力特征值 R

考虑承台效应的复合基桩竖向承载力特征值可按下列公式确定：

不考虑地震作用时

$$R = R_a + \eta_c f_{ak} A_c \qquad (9\text{-}221)$$

考虑地震作用时

$$R = R_a + \frac{\zeta_a}{1.25} \eta_c f_{ak} A_c \qquad (9\text{-}222)$$

$$A_c = (A - nA_{ps}) / n \qquad (9\text{-}223)$$

式中 η_c ——承台效应系数，可按表 9-62 取值；

f_{ak} ——承台下 1/2 承台宽度且不超过 5m 深度范围内各层土的地基承载力特征值按厚度加权的平均值，kN/m²；

A_c ——计算基桩所对应的承台底净面积，m²；

A_{ps} ——桩身截面面积，m²；

A ——承台计算域面积，对于杆塔桩基，A 为承台总面积，m²；

ζ_a ——地基抗震承载力调整系数，应按现行 GB 50011—2011《建筑抗震设计规范》采用。

当承台底为可液化土、湿陷性土、高灵敏度软土、欠固结土、新填土时，沉桩引起超孔隙水压力和土体隆起时，不考虑承台效应，取 $\eta_c = 0$。

表 9-62　承台效应系数 η_c

B_c/l \ s_a/d	3	4	5	6	>6
≤0.4	0.06～0.08	0.14～0.17	0.22～0.26	0.32～0.38	0.50～0.80
0.4～0.8	0.08～0.10	0.17～0.20	0.26～0.30	0.38～0.44	
>0.8	0.10～0.12	0.20～0.22	0.30～0.34	0.44～0.50	
单排桩条形承台	0.15～0.18	0.25～0.30	0.38～0.45	0.50～0.60	

注 1. 表中 s_a/d 为桩中心距与桩径之比；B_c/l 为承台宽度与桩长之比。当计算基桩为非正方形排列时，$s_a=\sqrt{A/n}$，A 为承台计算域面积，n 为总桩数。
2. 对于桩布置于墙下的箱、筏承台，η_c 可按单排桩条基取值。
3. 对于单排桩条形承台，当承台宽度小于 $1.5d$ 时，η_c 按非条形承台取值。
4. 对于采用后注浆灌注桩的承台，η_c 宜取低值。
5. 对于饱和黏性土中的挤土桩基、软土地基上的桩基承台，η_c 宜取低值的 0.8 倍。

4. 单桩竖向极限承载力标准值 Q_{uk}

在工程中对设计等级为甲级的杆塔桩基，有条件时应采用现场静载荷试验，并结合静力触探、标准贯入等原位测试方法综合确定；对设计等级为乙级的杆塔桩基，应根据静力触探、标准贯入、经验参数等估算，并依据地质条件相同的试桩资料，综合确定，当缺乏可参照的试桩资料或地质条件复杂时，应由现场静载荷试验确定；对设计等级为丙级的杆塔桩基，如无原位测试资料时，可利用承载力经验参数法估算。

（1）按单桩静载试验确定。采用现场静载荷试验

确定单桩下压极限承载力标准值时，在同一条件下的试桩数量不宜小于总桩数的 1%，且不应小于 3 根，工程总桩数在 50 根以内时不应小于 2 根。试验及单桩下压极限承载力可按现行 DL/T 5493—2014《电力工程基桩检测技术规范》取值。

（2）经验参数法。

1）当根据土的物理指标与承载力参数之间的经验关系确定单桩竖向极限承载力标准值时，根据 JGJ94—2008《建筑桩基技术规范》中 5.3.5 条，按下式估算。

$$Q_{uk}=Q_{sk}+Q_{pk}=u\sum q_{sik}l_i+q_{pk}A_p \quad (9\text{-}224)$$

式中 Q_{sk}、Q_{pk}——分别为总极限侧阻力标准值和总极限端阻力标准值，kN；

u——桩身周长，m；

q_{sik}——桩侧第 i 层土的极限侧阻力标准值，kN/m²，如无当地经验时，可按表 9-63 取值；

l_i——桩周第 i 层土的厚度，m；

q_{pk}——极限端阻力标准值，kN/m²，如无当地经验时，可按表 9-64 取值；

A_p——桩端面积，m²。

2）当根据土的物理指标与承载力参数之间的经验关系，确定大直径桩单桩极限承载力标准值时，可按下式计算。

$$Q_{uk}=Q_{sk}+Q_{pk}=u\sum \psi_{si}q_{sik}l_i+\psi_p q_{pk}A_p \quad (9\text{-}225)$$

式中 u——桩身周长，m，当人工挖孔桩桩周护壁为振捣密实的混凝土时，桩身周长可按护壁外直径计算；

ψ_{si}、ψ_p——大直径桩侧阻、端阻尺寸效应系数，按表 9-66 取值；

q_{sik}——桩侧第 i 层土极限侧阻力标准值，kN/m²，如无当地经验值时，可按表 9-63 取值，对于扩底桩变截面以上 $2d$ 长度范围不计侧阻力；

q_{pk}——桩径为 800mm 的极限端阻力标准值，kN/m²，对于干作业挖孔（清底干净）可采用深层载荷板试验确定；当不能进行深层载荷板试验时，可按表 9-65 取值。

表 9-63　桩的极限侧阻力标准值 q_{sik}　kPa

土的名称	土的状态		混凝土预制桩	泥浆护壁钻（冲）孔桩	干作业钻孔桩
填土			22～30	20～28	20～28
淤泥			14～20	12～18	12～18
淤泥质土			22～30	20～28	20～28
黏性土	流塑	$I_L>1$	24～40	21～38	21～38
	软塑	$0.75<I_L\leqslant 1$	40～55	38～53	38～53
	可塑	$0.50<I_L\leqslant 0.75$	55～70	53～68	53～66
	硬可塑	$0.25<I_L\leqslant 0.50$	70～86	68～84	66～82
	硬塑	$0<I_L\leqslant 0.25$	86～98	84～96	82～94
	坚硬	$I_L\leqslant 0$	98～105	96～102	94～104
红黏土	$0.7<a_w\leqslant 1$		13～32	12～30	12～30
	$0.5<a_w\leqslant 0.7$		32～74	30～70	30～70
粉土	稍密	$e>0.9$	26～46	24～42	24～42
	中密	$0.75\leqslant e\leqslant 0.9$	46～66	42～62	42～62
	密实	$e<0.75$	66～88	62～82	62～82
粉细砂	稍密	$10<N\leqslant 15$	24～48	22～46	22～46
	中密	$15<N\leqslant 30$	48～66	46～64	46～64
	密实	$N>30$	66～88	64～86	64～86
中砂	中密	$15<N\leqslant 30$	54～74	53～72	53～72
	密实	$N>30$	74～95	72～94	72～94

续表

土的名称	土的状态		混凝土预制桩	泥浆护壁钻（冲）孔桩	干作业钻孔桩
粗砂	中密 密实	$15<N\le30$ $N>30$	74～95 95～116	74～95 95～116	76～98 98～120
砾砂	稍密 中密（密实）	$5<N_{63.5}\le15$ $N_{63.5}>15$	70～110 116～138	50～90 116～130	60～100 112～130
圆砾、角砾	中密、密实	$N_{63.5}>10$	160～200	135～150	135～150
碎石、卵石	中密、密实	$N_{63.5}>10$	200～300	140～170	150～170
全风化软质岩		$30<N\le50$	100～120	80～100	80～100
全风化硬质岩		$30<N\le50$	140～160	120～140	120～150
强风化软质岩		$N_{63.5}>10$	160～240	140～200	140～220
强风化硬质岩		$N_{63.5}>10$	220～300	160～240	160～260

注 1. 对于尚未完成自重固结的填土和以生活垃圾为主的杂填土，不计算其侧阻力。
2. a_w 为含水比，$a_w = w / w_l$，w 为土的天然含水量，w_l 为土的液限。
3. N 为标准贯入击数；$N_{63.5}$ 为重型圆锥动力触探击数。
4. 全风化、强风化软质岩和全风化、强风化硬质岩系指其母岩分别为 $f_{rk}\le15$MPa、$f_{rk}>30$MPa 的岩石。

表 9-64　桩的极限端阻力标准值 q_{pk}　kPa

土名称	桩型 / 土的状态		混凝土预制桩桩长 l（m）				泥浆护壁钻（冲）孔桩桩长 l（m）				干作业钻孔桩桩长 l（m）		
			$l\le9$	$9<l\le16$	$16<l\le30$	$l>30$	$5\le l<10$	$10\le l<15$	$15\le l<30$	$30\le l$	$5\le l<10$	$10\le l<15$	$15\le l$
黏性土	软塑	$0.75<I_L\le1$	210～850	650～1400	1200～1800	1300～1900	150～250	250～300	300～450	300～450	200～400	400～700	700～950
	可塑	$0.50<I_L\le0.75$	850～1700	1400～2200	1900～2800	2300～3600	350～450	450～600	600～750	750～800	500～700	800～1100	1000～1600
	硬可塑	$0.25<I_L\le0.50$	1500～2300	2300～3300	2700～3600	3600～4400	800～900	900～1000	1000～1200	1200～1400	850～1100	1500～1700	1700～1900
	硬塑	$0<I_L\le0.25$	2500～3800	3800～5500	5500～6000	6000～6800	1100～1200	1200～1400	1400～1600	1600～1800	1600～1800	2200～2400	2600～2800
粉土	中密	$0.75\le e\le0.9$	950～1700	1400～2100	1900～2700	2500～3400	300～500	500～650	650～750	750～850	800～1200	1200～1400	1400～1600
	密实	$e<0.75$	1500～2600	2100～3000	2700～3600	3600～4400	650～900	750～950	900～1100	1100～1200	1200～1700	1400～1900	1600～2100
粉砂	稍密	$10<N\le15$	1000～1600	1500～2300	1900～2700	2100～3000	350～500	450～600	600～700	650～750	500～950	1300～1600	1500～1700
	中密、密实	$N>15$	1400～2200	2100～3000	3000～4500	3800～5500	600～750	750～900	900～1100	1100～1200	900～1000	1700～1900	1700～1900
细砂	中密、密实	$N>15$	2500～4000	3600～5000	4400～6000	5300～7000	650～850	900～1200	1200～1500	1500～1800	1200～1600	2000～2400	2400～2700
中砂			4000～6000	5500～7000	6500～8000	7500～9000	850～1050	1100～1500	1500～1900	1900～2100	1800～2400	2800～3800	3600～4400
粗砂			5700～7500	7500～8500	8500～10000	9500～11000	1500～1800	2100～2400	2400～2600	2600～2800	2900～3600	4000～4600	4600～5200

续表

土名称	桩型 土的状态		混凝土预制桩桩长 l（m）				泥浆护壁钻（冲）孔桩桩长 l（m）				干作业钻孔桩桩长 l（m）		
			$l\leqslant 9$	$9<l\leqslant 16$	$16<l\leqslant 30$	$l>30$	$5\leqslant l<10$	$10\leqslant l<15$	$15\leqslant l<30$	$30\leqslant l$	$5\leqslant l<10$	$10\leqslant l<15$	$15\leqslant l$
砾砂	中密、密实	$N>15$	6000～9500		9000～10500		1400～2000		2000～3200		3500～5000		
角砾、圆砾	中密、密实	$N_{63.5}>10$	7000～10000		9500～11500		1800～2200		2200～3600		4000～5500		
碎石、卵石	中密、密实	$N_{63.5}>10$	8000～11000		10500～13000		2000～3000		3000～4000		4500～6500		
全风化软质岩		$30<N\leqslant 50$	4000～6000				1000～1600				1200～2000		
全风化硬质岩		$30<N\leqslant 50$	5000～8000				1200～2000				1400～2400		
强风化软质岩		$N_{63.5}>10$	6000～9000				1400～2200				1600～2600		
强风化硬质岩		$N_{63.5}>10$	7000～11000				1800～2800				2000～3000		

注 1. 砂土和碎石类土中桩的极限端阻力取值，宜综合考虑土的密实度，桩端进入持力层的深径比 h_b/d，土愈密实，h_b/d 愈大，取值愈高。

2. 预制桩的岩石极限端阻力指桩端支承于中、微风化基岩表面或进入强风化岩、软质岩一定深度条件下极限端阻力。

3. 全风化、强风化软质岩和全风化、强风化硬质岩指其母岩分别为 $f_{rk}\leqslant 15$MPa、$f_{rk}>30$MPa 的岩石。

表 9-65　干作业挖孔桩（清底干净，$D=800$mm）极限端阻力标准值 q_{pk}　kPa

土名称		状态		
黏性土		$0.25<I_L\leqslant 0.75$	$0<I_L\leqslant 0.25$	$I_L\leqslant 0$
		800～1800	1800～2400	2400～3000
粉土			$0.75\leqslant e\leqslant 0.9$	$e<0.75$
			1000～1500	1500～2000
砂土碎石类土		稍密	中密	密实
	粉砂	500～700	800～1100	1200～2000
	细砂	700～1100	1200～1800	2000～2500
	中砂	1000～2000	2200～3200	3500～5000
	粗砂	1200～2200	2500～3500	4000～5500
	砾砂	1400～2400	2600～4000	5000～7000
	圆砾、角砾	1600～3000	3200～5000	6000～9000
	卵石、碎石	2000～3000	3300～5000	7000～11000

注 1. 当桩进入持力层的深度 h_b 分别为：$h_b\leqslant D$，$D<h_b\leqslant 4D$，$h_b>4D$ 时，q_{pk} 可相应取低、中、高值。

2. 砂土密实度可根据标贯击数判定，$N\leqslant 10$ 为松散，$10<N\leqslant 15$ 为稍密，$15<N\leqslant 30$ 为中密，$N>30$ 为密实。

3. 当桩的长径比 $l/d\leqslant 8$ 时，q_{pk} 宜取较低值。

4. 当对沉降要求不严时，q_{pk} 可取高值。

表 9-66　大直径灌注桩侧阻尺寸效应系数 ψ_{si}、端阻尺寸效应系数 ψ_p

土类型	黏性土、粉土	砂土、碎石类土
ψ_{si}	$(0.8/d)^{1/5}$	$(0.8/d)^{1/3}$
ψ_p	$(0.8/D)^{1/4}$	$(0.8/D)^{1/3}$

注　当为等直径桩时，$D=d$。

5. 基桩或复合基桩承载力验算

（1）荷载效应标准组合：

轴心竖向力作用下

$$\gamma_f N_k \leqslant R \qquad (9\text{-}226)$$

偏心竖向力作用下除满足式（9-226）外，应满足式（9-227）的要求：

$$\gamma_f N_{kmax} \leqslant 1.2R \qquad (9\text{-}227)$$

（2）地震作用效应和荷载效应标准组合：

轴心竖向力作用下

$$\gamma_f N_{Ek} \leqslant 1.25R \qquad (9\text{-}228)$$

偏心竖向力作用下，除满足上式外，尚应满足下式的要求。

$$\gamma_f N_{Ekmax} \leqslant 1.25R \qquad (9\text{-}229)$$

式中　N_k ——荷载效应标准组合轴心竖向力作用下，基桩或复合基桩的平均竖向力，kN；

N_{kmax} ——荷载效应标准组合偏心竖向力作用下，桩顶最大竖向力，kN；

N_{Ek} ——地震作用效应和荷载效应标准组合下，基桩或复合基桩的平均竖向力，kN；

N_{Ekmax} ——地震作用效应和荷载效应标准组合下，基桩或复合基桩的最大竖向力，kN；

R ——基桩或复合基桩竖向承载力特征值，kN。

（六）桩上拔承载力计算

1. 单桩、基桩的抗拔极限承载力标准值

单桩、基桩的抗拔极限承载力标准值的确定，对于设计等级为甲级和乙级的杆塔桩基，有条件时单桩或基桩的上拔极限承载力标准值应通过现场单桩上拔静载荷试验确定；如无当地经验时，群桩基础及设计等级为丙级的桩基，可按公式计算法确定。

（1）按单桩上拔静载试验确定单桩、基桩的抗拔极限承载力标准值。

单桩上拔静载荷试验及抗拔极限承载力标准值取值可按现行行业标准 DL/T 5493—2014《电力工程基桩检测技术规范》进行。

（2）公式计算法。

1）群桩呈非整体破坏时，基桩的抗拔极限承载力标准值可按下式计算：

$$T_{uk}=\sum\lambda_i q_{sik}u_i l_i \qquad (9\text{-}230)$$

式中 T_{uk} ——单桩或基桩呈非整体破坏时抗拔极限承载力标准值，kN；

u_i ——桩身周长，m，对于等直径桩取 $u=\pi d$；对于扩底桩按表 9-67 取值；

λ_i ——抗拔系数，可按表 9-68 取值。

表 9-67　扩底桩破坏表面周长 u_i

自桩底起算的长度 l_i	≤（4～10）d	>（4～10）d
u_i	πD	πd

注　l_i 对于软土取低值，对于卵石、砾石取高值；l_i 取值随内摩擦角增大而增加。

表 9-68　抗拔系数 λ

土类	λ_i 值
砂土	0.50～0.70
黏性土、粉土	0.70～0.80

注　1. 桩长 l 与桩径 d 之比小于 20 时，λ_i 取小值；
2. 对于微型桩基础，砂土可取 0.5，黏性土、粉土可取 0.6。

2）群桩呈整体破坏时，基桩的抗拔极限承载力标准值可按下式计算。

$$T_{gk}=\frac{1}{n}u_l\sum\lambda_i q_{sik}l_i \qquad (9\text{-}231)$$

式中 u_l ——桩群外围周长，m。

2. 单桩及桩基中基桩的上拔承载力验算

（1）荷载效应标准组合。单桩及桩基中基桩的上拔承载力计算应符合下述极限状态计算表达式。.

单桩

$$\gamma_f T_k \leqslant T_{uk}/K+G_p \qquad (9\text{-}232)$$

桩基中的基桩应同时满足以下两式

$$\gamma_f T_{kmax} \leqslant T_{uk}/K+G_p \qquad (9\text{-}233)$$

$$\gamma_f T_k \leqslant T_{gk}/K+G_{gp} \qquad (9\text{-}234)$$

式中 T_k ——按荷载效应标准组合计算的单桩或基桩上拔力，kN；

T_{gk} ——群桩呈整体破坏时基桩的抗拔极限承载力标准值，kN；

T_{uk} ——单桩或基桩的抗拔极限承载力标准值，kN；

G_{gp} ——群桩基础所包围体积的桩土总自重除以总桩数，地下水位以下取浮重度，kN；

G_p ——单桩（土）或基桩（土）自重，地下水位以下取浮重度，kN，对于扩底桩应按表 9-67 确定桩、土柱体周长，计算桩、土自重；

K ——安全系数，取 $K=2$。

（2）地震作用效应组合。

单桩

$$\gamma_f T_k \leqslant 1.25\left(T_{uk}/K+G_p\right) \qquad (9\text{-}235)$$

桩基中的基桩应同时满足以下两式

$$\gamma_f T_{kmax} \leqslant 1.25\left(T_{uk}/K+G_p\right) \qquad (9\text{-}236)$$

$$\gamma_f T_k \leqslant 1.25\left(T_{gk}/K+G_{gp}\right) \qquad (9\text{-}237)$$

（七）水平承载力和位移计算（单桩和群桩基础）

架空输电线路中杆塔的灌注桩基础均为受水平力作用的单桩及桩基，单桩或基桩的内力和位移计算以及群桩基础基柱的桩顶荷载效应计算宜按考虑承台、基桩协同工作和土的弹性抗力共同作用的分析方法进行。该分析方法的基本假定、基本计算参数、计算公式如下。

1. 基本假定

（1）将土体视为弹性变形介质，其水平抗力系数随深度线性增加（m 法），地面处为零。对于低承台桩基，在计算桩基时，假定桩顶标高处的水平抗力系数为零并随深度增长。

（2）在水平力和竖向压力作用下，基桩、承台表面上任一点的接触应力（法向弹性抗力）与该点的法

向位移δ成正比。

（3）忽略桩身、承台侧面与土之间的黏着力和摩擦力对抵抗水平力的作用。

（4）按复合桩基设计时，可考虑承台底土的竖向抗力和水平摩擦阻力。

（5）桩顶与承台刚性连接（固接），承台的刚度视为无穷大。因此，只有当承台的刚度较大，或由于上部结构与承台的协同作用使承台的刚度得到增强的情况下，才适于采用此种方法计算。计算中考虑土的弹性抗力时，要注意土体的稳定性。

2. 基本计算参数

（1）桩侧土水平抗力系数的比例系数m，宜通过单桩水平静载试验确定，当无静载试验资料时，可按表 9-69 取值。

表 9-69 地基土水平抗力系数的比例系数 m

序号	地基土类别	预制桩、钢桩		灌注桩	
		m (MN/m^4)	相应单桩在地面处水平位移（mm）	m (MN/m^4)	相应单桩在地面处水平位移（mm）
1	淤泥；淤泥质土；饱和湿陷性黄土	2～4.5	10	2.5～6	6～12
2	流塑（$I_L>1$）、软塑（$0.75<I_L\leqslant1$）状黏性土；$e>0.9$ 粉土；松散粉细砂；松散、稍密填土	4.5～6.0	10	6～14	4～8
3	可塑（$0.25<I_L\leqslant0.75$）状黏性土、湿陷性黄土；$e=0.75$～0.9 粉土；中密填土；稍密细砂	6.0～10	10	14～35	3～6
4	硬塑（$0<I_L\leqslant0.25$）、坚硬（$I_L\leqslant0$）状黏性土、湿陷性黄土；$e<0.75$ 粉土；中密的中粗砂；密实老填土	10～22	10	35～100	2～5
5	中密、密实的砾砂、碎石类土			100～300	1.5～3

注 1. 当桩顶水平位移大于表列数值或灌注桩配筋率较高（≥0.65%）时，m 值应适当降低；当预制桩的水平向位移小于 10mm 时，m 值可适当提高。
2. 当水平荷载为长期或经常出现的荷载时，应将表列数值乘以 0.4 降低采用。
3. 当地基为可液化土层时，应将表列数值乘以表 9-79 中相应的系数。

当基桩侧面为几种土层组成时，应求得主要影响深度 $h_m=2(d+1)$m 范围内的 m 值作为计算值（图 9-54）。

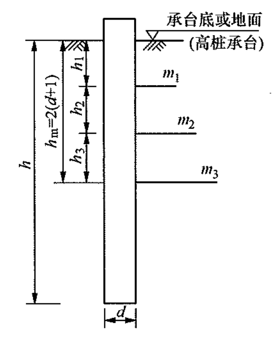


图 9-54 分层 m 值分层计算示意图

当 h_m 深度内存在两层不同土时

$$m=\frac{m_1h_1^2+m_2(2h_1+h_2)h_2}{h_m^2} \tag{9-238}$$

当 h_m 深度内存在三层不同土时

$$m=\frac{m_1h_1^2+m_2(2h_1+h_2)h_2+m_3(2h_1+2h_2+h_3)h_3}{h_m^2} \tag{9-239}$$

（2）承台侧面地基土水平抗力系数 C_n：

$$C_n=mh_n \tag{9-240}$$

式中 m ——承台埋深范围地基土的水平抗力系数的比例系数，MN / m^4；

h_n ——承台埋深，m。

（3）地基土竖向抗力系数 C_0、C_b、C_R 和地基土竖向抗力系数的比例系数 m_0：

1）桩底面地基土竖向抗力系数 C_0 为

$$C_0=m_0h \tag{9-241}$$

式中 m_0 ——桩底面地基土竖向抗力系数的比例系数，MN/m^4，近似取 $m_0=m$；

h ——桩的入土深度，m，当 h 小于 10m 时，按 10m 计算。

2）承台底地基土竖向抗力系数 C_b 为

$$C_b=m_0h_n\eta_c \tag{9-242}$$

式中 h_n ——承台埋深，m，当 h_n 小于 1m 时，按 1m 计算；

η_c ——承台效应系数，按表 9-62 确定。

当承台底为可液化土、湿陷性土、高灵敏度软土、欠固结土、新填土时，沉桩引起超孔隙水压力和土体隆起时，不考虑承台效应，取 $\eta_c=0$。

3）岩石地基的竖向抗力系数 C_R，不随岩层埋深而增长，其值按表 9-70 采用；

表 9-70　岩石地基竖向抗力系数 C_R

岩石饱和单轴抗压强度标准值 f_{rc}（kPa）	C_R（MN/m³）
1000	300
≥25000	15000

注　f_{rc} 为表列数值的中间值；C_R 采用插入法确定。

（4）桩身抗弯刚度 EI：对于钢筋混凝土桩，$EI=0.85E_cI_0$，其中 I_0 为桩身换算截面惯性矩，圆形截面为 $I_0=W_0d_0/2$，矩形截面为 $I_0=W_0b_0/2$。W_0 为桩身换算截面受拉边缘的截面模量，按下式计算：

圆形截面为

$$W_0=\frac{\pi d}{32}\left[d^2+2\left(\alpha_E-1\right)\rho_g d_0^2\right]$$

方形截面为

$$W_0=\frac{b}{6}\left[b^2+2\left(\alpha_E-1\right)\rho_g b_0{}^2\right]$$

式中　d——桩直径，m；

d_0——扣除保护层厚度的桩直径，m；

b——方形截面边长，m；

b_0——扣除保护层厚度的桩截面宽度，m；

α_E——钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值；

ρ_g——桩身配筋率。

（5）桩的水平变形系数 $\alpha\left(m^{-1}\right)$ 为

$$\alpha=\sqrt[5]{\frac{mb_0}{EI}} \tag{9-243}$$

式中　m——桩侧土水平抗力系数的比例系数；

b_0——桩身的计算宽度，m。

圆形桩：当直径 $d\leqslant 1$m 时，$b_0=0.9\times(1.5d+0.5)$；当直径 $d>1$m 时，$b_0=0.9\times(d+1)$；

方形桩：当边宽 $b\leqslant 1$m 时，$b_0=1.5b+0.5$；当边宽 $b>1$m 时，$b_0=b+1$。

根据水平力作用下单桩的承载变形性状，可将桩分为刚性桩、半刚性桩、柔性桩，半刚性桩和柔性桩统称为弹性桩。m 法关于刚性桩和弹性桩的划分准则以桩的水平变形系数 α（表征了桩与土的相对刚度）与桩入土长度 l 的乘积 αl 的大小而定，见表 9-71。

表 9-71　m 法的刚性桩和弹性桩的划分准则

计算方法		m 法
刚性桩		$\alpha l\leqslant 2.5$
弹性桩	半刚性桩	$2.5<\alpha l<4.0$
	柔性桩	$4.0\leqslant\alpha l$

（6）桩身轴向拉压力传递系数 $\xi_N=0.5\sim1.0$，桩基承受上拔荷载时，取小值；承受下压荷载时，摩擦型桩取小值，端承型桩取大值。

（7）地基土与承台板之间的摩阻系数 μ，按表 9-72 取值。

表 9-72　承台底与地基土间的摩阻系数 μ

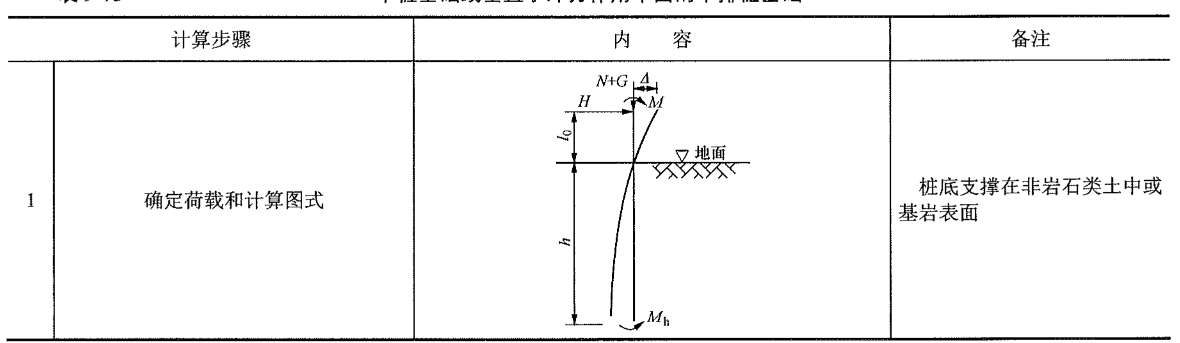
土的类别		摩阻系数 μ
黏性土	可塑	0.25
	硬塑	0.25～0.30
	坚硬	0.30～0.40
砂土		0.40
碎石土		0.40～0.50
软质岩石		0.40～0.60
表面粗糙的硬质岩石		0.65～0.75

3. 计算公式

坐标原点 O 位于承台底的桩群形心，水平坐标 x 向右为正，竖向坐标 y 向下为正。水平荷载 H、竖向荷载 $N+G$、弯矩 M 均通过坐标原点。正负号规定：桩身水平位移 x_0 顺 ox 轴正方向为正值，桩身转角逆时针方向为正值；弯矩 M 当左侧纤维受拉时为正值，水平力 H 顺 ox 轴正方向为正值，竖向力 $N+G$ 顺 oy 轴正方向为正值。

（1）单桩基础或垂直于外力作用平面的单排桩基础，见表 9-73。

表 9-73　单桩基础或垂直于外力作用平面的单排桩基础

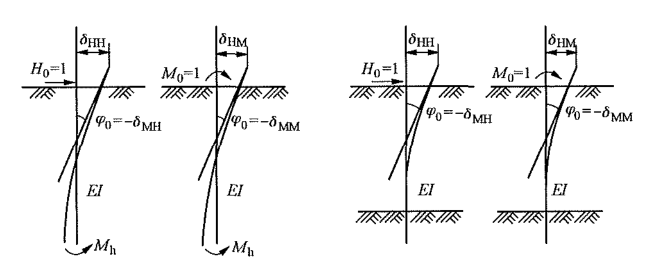


计算步骤		内　容	备注
1	确定荷载和计算图式	（图）	桩底支撑在非岩石类土中或基岩表面

续表

计算步骤				内容	备注
2	确定基本参数			m、EI、α	
3	求地面处桩身内力		弯矩（$F\times L$） 水平力（F）	$M_0=\frac{M}{n}+\frac{H}{n}l_0 \quad H_0=\frac{H}{n}$	n—单排桩的桩数；低承台桩时，令 $l_0=0$
4	求单位力作用于桩身地面处，桩身在该处产生的变位	$H_0=1$ 作用时	水平位移（$F^{-1}\times L$）	$\delta_{HH}=\frac{1}{\alpha^3EI}\times\frac{(B_3D_4-B_4D_3)+K_h(B_2D_4-B_4D_2)}{(A_3B_4-A_4B_3)+K_h(A_2B_4-A_4B_2)}$	对于受拔桩，应取 $K_h=0$； 桩底支承于非岩石类土中，且当 $h>2.5/\alpha$ 可令 $K_h=0$； 桩底支承基岩面上，且当 $h>3.5/\alpha$ 可令 $K_h=0$。 K_h 计算见本表注。 系数 $A_1\cdots D_4$、A_f、B_f、C_f 根据 $\bar{h}=\alpha h$ 查表 9-76
			转角（F^{-1}）	$\delta_{MH}=\frac{1}{\alpha^2EI}\times\frac{(A_3D_4-A_4D_3)+K_h(A_2D_4-A_4D_2)}{(A_3B_4-A_4B_3)+K_h(A_2B_4-A_4B_2)}$	
		$M_0=1$ 作用时	水平位移（$F^{-1}\times L$）	$\delta_{HM}=\delta_{MH}$	
			转角（$F^{-1}\times L^{-1}$）	$\delta_{MM}=\frac{1}{\alpha EI}\times\frac{(A_3C_4-A_4C_3)+K_h(A_2C_4-A_4C_2)}{(A_3B_4-A_4B_3)+K_h(A_2B_4-A_4B_2)}$	
5	求地面处桩身的变位		水平位移（L） 转角（弧角）	$x_0=H_0\delta_{HH}+M_0\delta_{HM}$ $\varphi_0=-(H_0\delta_{MH}+M_0\delta_{MM})$	
6	求地面以下任一深度的桩身内力		弯矩（$F\times L$） 水平力（F）	$M_y=\alpha^2EI\left(x_0A_3+\frac{\varphi_0}{\alpha}B_3+\frac{M_0}{\alpha^2EI}C_3+\frac{H_0}{\alpha^3EI}D_3\right)$ $H_y=\alpha^3EI\left(x_0A_4+\frac{\varphi_0}{\alpha}B_4+\frac{M_0}{\alpha^2EI}C_4+\frac{H_0}{\alpha^3EI}D_4\right)$	
7	求桩顶水平位移		（L）	$\Delta=x_0-\varphi_0l_0+\Delta_0$ 其中 $\Delta_0=\frac{Hl_0^3}{3nEI}+\frac{Ml_0^2}{2nEI}$	
8	求桩身最大弯矩及其位置		最大弯矩位置（L）	由 $\frac{\alpha M_0}{H_0}=C_1$ 查表 9-79 得相应的 αy，$y_{Mmax}=\frac{\alpha y}{\alpha}$	$C_Ⅰ$、$D_Ⅱ$ 查表 9-77
			最大弯矩（$F\times L$）	$M_{max}=\frac{H_0D_Ⅱ}{\alpha}$	

注 1. δ_{HH}、δ_{MH}、δ_{HM}、δ_{MM} 的图示意义：



(a) 桩端支承在非岩石类土中或基岩表面　　(b) 桩端嵌固于基岩中

2. 当桩底嵌固于基岩中时，δ_{HH}、δ_{MH}、δ_{HM}、δ_{MM} 按下列公式计算：

$$\delta_{HH}=\frac{1}{\alpha^3EI}\times\frac{B_2D_1-B_1D_2}{A_2B_1-A_1B_2}\ ;\quad \delta_{MH}=\frac{1}{\alpha^2EI}\times\frac{A_2D_1-A_1D_2}{A_2B_1-A_1B_2}\ ;\quad \delta_{HM}=\delta_{MH}\quad \delta_{MM}=\frac{1}{\alpha EI}\times\frac{A_2C_1-A_1C_2}{A_2B_1-A_1B_2}$$

3. 系数 K_h

$$K_h=\frac{C_0I_0}{\alpha EI}$$

式中 I_0——桩底截面惯性矩，m^4；对于非扩底 $I_0=I$。

4. 表中 F、L 分别为表示力、长度的量纲。

（2）位于（或平行于）外力作用平面的单排（或多排）桩低承台桩基，见表 9-74。

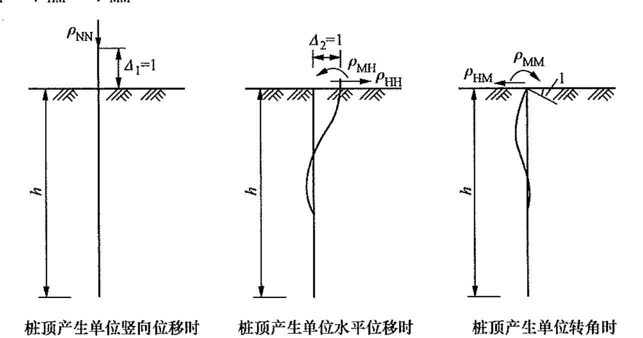
表 9-74　　位于（或平行于）外力作用平面的单排（或多排）桩低承台桩基

计算步骤				内容	备注
1	确定荷载和计算图式				坐标原点应选在桩群对称点上或重心上
2	确定基本计算参数			m、m_0、EI、α、ξ_N、C_0、C_b、μ	
3	求单位力作用于桩顶时，桩顶产生的变位	$H=1$ 作用时	水平位移（$F^{-1}\cdot L$）	δ_{HH}	公式同表 9-73 中步骤 4，且 $K_h=0$；当桩底嵌入基岩中时，应按表 9-73 注 2 计算
			转角（F^{-1}）	δ_{MH}	
		$M=1$ 作用时	水平位移（F^{-1}）	$\delta_{HM}=\delta_{MH}$	
			转角（$F^{-1}\cdot L^{-1}$）	δ_{MM}	
4	求承台发生单位变位时，在桩顶引起的内力	发生单位竖向位移时	轴向力（$F\cdot L^{-1}$）	对于受压桩 $\rho_{NN}=\dfrac{1}{\dfrac{\zeta_N h}{EA}+\dfrac{1}{C_0A_0}}$ 对于受拔桩 $\rho_{NN}=\dfrac{E_sA_s}{\zeta_N h}$	$EA=E_cA_c+E_sA_s$ E_c—桩身混凝土的弹性模量，kN/m²； A_c—桩身混凝土的净面积，m²； E_s—桩身主筋的弹性模量，kN/m²； A_s—桩身主筋的面积，m²
		发生单位水平位移时	水平力（$F\cdot L^{-1}$）	$\rho_{HH}=\dfrac{\delta_{MM}}{\delta_{HH}\delta_{MM}-\delta_{MH}^2}$	
			弯矩（F）	$\rho_{MH}=\dfrac{\delta_{MH}}{\delta_{HH}\delta_{MM}-\delta_{MH}^2}$	
		发生单位转角时	水平力（F）	$\rho_{HM}=\rho_{MH}$	
			弯矩（$F\cdot L$）	$\rho_{MM}=\dfrac{\delta_{HH}}{\delta_{HH}\delta_{MM}-\delta_{MH}^2}$	
5	求承台发生单位变位时所有桩顶、承台和侧墙引起的反力和	发生单位竖向位移时	竖向反力（$F\cdot L^{-1}$）	$\gamma_{VV}=n\rho_{NN}+C_bA_b$	$B_0=B+1$ B—垂直于力作用面方向的承台宽，m； A_b、I_b、F^c、S^c 和 I^c—详见本表注 3、4；
			水平反力（$F\cdot L^{-1}$）	$\gamma_{UV}=\mu C_bA_b$	
		发生单位水平位移时	水平反力（$F\cdot L^{-1}$）	$\gamma_{UU}=n\rho_{HH}+B_0F^c$	
			反弯矩（F）	$\gamma_{\beta U}=-n\rho_{MH}+B_0S^c$	
		发生单位转角时	水平反力（F）	$\gamma_{U\beta}=\gamma_{\beta U}$	
			反弯矩（$F\cdot L$）	$\gamma_{\beta\beta}=n\rho_{MM}+\rho_{NN}\sum K_ix_i^2+B_0I^c+C_bI_b$	
6	求承台变位	竖向位移（L）		$V=\dfrac{N+G}{\gamma_{VV}}$	
		水平位移（L）		$U=\dfrac{\gamma_{\beta\beta}H-\gamma_{U\beta}M}{\gamma_{UU}\gamma_{\beta\beta}-\gamma_{U\beta}^2}-\dfrac{(N+G)\gamma_{UV}\gamma_{\beta\beta}}{\gamma_{VV}(\gamma_{UU}\gamma_{\beta\beta}-\gamma_{U\beta}^2)}$	

续表

计算步骤			内容	备注
6	求承台变位	转角（弧度）	$\beta=\dfrac{\gamma_{UU}M-\gamma_{U\beta}H}{\gamma_{UU}\gamma_{\beta\beta}-\gamma_{U\beta}^2}+\dfrac{(N+G)\gamma_{UV}\gamma_{U\beta}}{\gamma_{VV}(\gamma_{UU}\gamma_{\beta\beta}-\gamma_{U\beta}^2)}$	
7	求任一基桩桩顶内力	轴向力（F）	$N_{0i}=(V+\beta\cdot x_i)\rho_{NN}$	x_i 在原点以右取正，以左取负
		水平力（F）	$H_{0i}=U\rho_{HH}-\beta\rho_{HM}$	
		弯矩（F·L）	$M_{0i}=\beta\rho_{MM}-U\rho_{MH}$	
8	求任一深度桩身弯矩	弯矩（F·L）	$M_y=\alpha^2EI\left(UA_3+\dfrac{\beta}{\alpha}B_3+\dfrac{M_0}{\alpha^2EI}C_3+\dfrac{H_0}{\alpha^3EI}D_3\right)$	A_3、B_3、C_3、D_3 查表 9-76，当桩身变截面配筋时做该项计算
9	求任一基桩桩身最大弯矩及其位置	最大弯矩位置（L）	y_{Mmax}	计算公式同表 9-73
		最大弯矩（F·L）	M_{max}	
10	求承台和侧墙的弹性抗力	水平抗力（F）	$H_E=UB_0F^c+\beta B_0S^c$	10、11、12 项为非必算内容
		反弯矩（F·L）	$M_E=UB_0S^c+\beta B_0I^c$	
11	求承台低地基土的弹性抗力和摩阻力	竖向抗力（F）	$N_b=VC_bA_b$	
		水平抗力（F）	$H_b=\mu N_b$	
		反弯矩（F·L）	$M_b=\beta C_bI_b$	
12	校核水平力的计算结果		$\sum H_i+H_E+H_b=H$	

注 1. ρ_{NN}、ρ_{HH}、ρ_{MH}、ρ_{HM} 和 ρ_{MM} 的图示意义



2. A_0 为单桩桩底压力分布面积，m²，对于端承桩型，A_0 为单桩的底面积，对于摩擦型桩，取下列两公式计算值之较小者：

$$A_0=\pi\left(h\tan\frac{\varphi_m}{4}+\frac{d}{2}\right)^2\quad A_0=\frac{\pi}{4}S^2$$

式中 h——桩入土深度，m；

φ_m——桩周各土层内摩擦角的加权平均值，(°)；

d——桩的设计直径，m；

S——桩的中心距，m。

3. F^C、S^C、I^C 分别为承台底面以上侧向水平抗力系数 C 图形的面积，m²，对于底面的面积矩，m³，惯性矩，m⁴，有

$$F^C=\frac{C_nh_n}{2}$$

$$S^C=\frac{C_nh_n^2}{6}$$

$$I^C=\frac{C_nh_n^3}{12}$$

式中 C_n——承台侧面地基土水平抗力系数，kN/m⁴；

h_n——承台埋深，m。

4. A_b、I_b 为承台底与地基土的接触面积，m²，惯性矩，m⁴，有

$$A_b = S_1 - nA$$
$$I_b = I_F - \sum AK_i x_i^2$$
$$I_F = BL_c^3/12$$

式中 S_1 ——承台底面积，m²；

nA ——各基桩桩顶横截面积和，m²；

I_F ——承台底面积的惯性矩，m⁴；

B ——垂直于力作用面方向的承台宽，m；

n ——基桩数；

x_i ——坐标原点至各桩的距离，m；

K_i ——第 i 排桩的桩数；

L_c ——力作用方向的承台长度，m。

（3）位于（或平行于）外力作用平面的单排（或多排）桩高承台桩基，见表 9-75。

表 9-75　　位于（或平行于）外力作用平面的单排（或多排）桩高承台桩基

计算步骤				内容	备注
1	确定荷载和计算图式				坐标原点应选在桩群对称点上或重心上
2	确定基本计算参数			m、m_0、EI、α、ξ_N、C_0	
3	求单位力作用桩身地面处，桩身在该处产生的变位			δ_{HH}、δ_{MH}、δ_{HM}、δ_{MM}	公式同表 9-74
4	求单位力作用于桩顶时，桩顶产生的变位	$H_i=1$ 作用时	水平位移（$F^{-1}\cdot L$）	$\delta'_{HH} = \dfrac{l_0^3}{3EI} + \delta_{MM}l_0^2 + 2\delta_{MH}l_0 + \delta_{HH}$	
			转角（F^{-1}）	$\delta'_{MH} = \dfrac{l_0^2}{2EI} + \delta_{MM}l_0 + \delta_{MH}$	
		$M_i=1$ 作用时	水平位移（F^{-1}）	$\delta'_{HM} = \delta'_{MH}$	
			转角（$F^{-1}\cdot L^{-1}$）	$\delta'_{MM} = \dfrac{l_0}{EI} + \delta_{MM}$	
5	求承台发生单位变位时，桩顶引起的内力	单位竖向位位移时	轴向力（$F\cdot L^{-1}$）	对于受压桩 $\rho_{NN} = \dfrac{1}{\dfrac{l_0+\zeta_N h}{EA} + \dfrac{1}{C_0A_0}}$ 对于受拔桩 $\rho_{NN} = \dfrac{E_sA_s}{\zeta_N h}$	
		发生水平单位位移时	水平力（$F\cdot L^{-1}$）	$\rho_{HH} = \dfrac{\delta'_{MM}}{\delta'_{HM}\delta'_{MM} - \delta'^2_{MH}}$	
			弯矩（F）	$\rho_{MH} = \dfrac{\delta'_{MH}}{\delta'_{HH}\delta'_{MM} - \delta'^2_{MH}}$	
		发生单位转角时	水平力（F）	$\rho_{HM} = \rho_{MH}$	
			弯矩（$F\cdot L$）	$\rho_{MM} = \dfrac{\delta'_{HH}}{\delta'_{HH}\delta'_{MM} - \delta'^2_{MH}}$	

续表

计算步骤				内容	备注
6	求承台发生单位变位时，所有桩顶引起的反力和	单位竖向位移时	竖向反力（$F\cdot L^{-1}$）	$\gamma_{VV}=n\rho_{NN}$	n—基桩数； x_i—坐标原点至各桩的距离，m； K_i—第 i 排桩的根数
		单位水平位移时	水平反力（$F\cdot L^{-1}$）	$\gamma_{UU}=n\rho_{HH}$	
			反弯矩（F）	$\gamma_{\beta U}=-n\rho_{MH}$	
		单位转角时	水平反力（F）	$\gamma_{U\beta}=\gamma_{\beta U}$	
			反弯矩（$F\cdot L$）	$\gamma_{\beta\beta}=n\rho_{MM}+\rho_{NN}\sum K_i x_i^2$	
7	求承台变位	竖直位移（L）		$V=\dfrac{N+G}{\gamma_{VV}}$	
		水平位移（L）		$U=\dfrac{\gamma_{\beta\beta}H-\gamma_{U\beta}M}{\gamma_{UU}\gamma_{\beta\beta}-\gamma_{U\beta}^2}$	
		转角（弧度）		$\beta=\dfrac{\gamma_{UU}M-\gamma_{U\beta}H}{\gamma_{UU}\gamma_{\beta\beta}-\gamma_{U\beta}^2}$	
8	求任一基桩桩顶内力	竖向力（F）		$N_i=(V+\beta\cdot x_i)\rho_{NN}$	x_i 在原点 O 以右取正，以左取负，m
		水平力（F）		$H_i=U\rho_{HH}-\beta\rho_{HM}=\dfrac{H}{n}$	
		弯矩（$F\cdot L$）		$M_i=\beta\rho_{MM}-U\rho_{MH}$	
9	求地面处任一基桩桩身截面上的内力	水平力（F）		$H_{0i}=H_i$	
		弯矩（$F\cdot L$）		$M_{0i}=M_i+H_i l_0$	
10	求地面处任一基桩桩身的变位	水平位移（F）		$x_{0i}=H_{0i}\delta_{HH}+M_{0i}\delta_{HM}$	
		转角（弧度）		$\varphi_{0i}=-(H_{0i}\delta_{MH}+M_{0i}\delta_{MM})$	
11	求任一基桩地面下任一深度桩身截面内力	弯矩（$F\cdot L$）		$M_{yi}=\alpha^2 EI\left(x_{0i}A_3+\dfrac{\varphi_{0i}}{\alpha}B_3+\dfrac{M_{0i}}{\alpha^2 EI}C_3+\dfrac{H_{0i}}{\alpha^3 EI}D_3\right)$	$A_3\cdots D_4$ 查表 9-76，当桩身变截面配筋时做该项计算
		水平力（F）		$H_{yi}=\alpha^3 EI\left(x_{0i}A_4+\dfrac{\varphi_{0i}}{\alpha}B_4+\dfrac{M_{0i}}{\alpha^2 EI}C_4+\dfrac{H_{0i}}{\alpha^3 EI}D_4\right)$	
12	求任一基桩桩身最大弯矩及其位置	最大弯矩位置（L）		y_{Mmax}	计算公式同表 9-73
		最大弯矩（$F\cdot L$）		M_{max}	

（4）按照表 9-73～表 9-75 中的方法计算桩身内力与桩顶位移时，需要查表 9-76 和表 9-77 得到影响函数值 A_1～D_1、A_2～D_2、A_3～D_3、A_4～D_4。

表 9-76　影 响 函 数 值 表

换算深度 $\bar{h}=\alpha y$	A_3	B_3	C_3	D_3	A_4	B_4	C_4	D_4	$B_3D_4-B_4D_3$	$A_3B_4-A_4B_3$	$B_2D_4-B_4D_2$
0	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.0000	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	1.00000
0.1	−0.00017	−0.00001	1.00000	0.10000	−0.00500	−0.00033	−0.00001	1.00000	0.00002	0.00000	1.00000
0.2	−0.00133	−0.00013	0.99999	0.20000	−0.02000	−0.00267	−0.00020	0.99999	0.00040	0.00000	1.00004
0.3	−0.00450	−0.00067	0.99994	0.30000	−0.04500	−0.00900	−0.00101	0.99992	0.00203	0.00001	1.00029
0.4	−0.01067	−0.00213	0.99974	0.39998	−0.08000	−0.02133	−0.00320	0.99966	0.00640	0.00006	1.00120

续表

换算深度 $\bar{h}=\alpha y$	A_3	B_3	C_3	D_3	A_4	B_4	C_4	D_4	$B_3D_4-B_4D_3$	$A_3B_4-A_4B_3$	$B_2D_4-B_4D_2$
0.5	-0.02083	-0.00521	0.99922	0.49991	-0.12499	-0.04167	-0.00781	0.99896	0.01563	0.00022	1.00365
0.6	-0.03600	-0.01080	0.99806	0.59974	-0.17997	-0.07199	-0.01620	0.99741	0.03240	0.00065	1.00917
0.7	-0.05716	-0.02001	0.99580	0.69935	-0.24490	-0.11433	-0.03001	0.99440	0.06006	0.00163	1.01962
0.8	-0.08532	-0.03412	0.99181	0.79854	-0.31975	-0.17060	-0.05120	0.98908	0.10248	0.00365	1.03824
0.9	-0.12144	-0.05466	0.98524	0.89705	-0.40443	-0.24284	-0.08198	0.98032	0.16426	0.00738	1.06893
1.0	-0.16652	-0.08329	0.97501	0.99445	-0.49881	-0.33298	-0.12493	0.96667	0.25062	0.01390	1.11679
1.1	-0.22152	-0.12192	0.95975	1.09016	-0.60268	-0.44292	-0.18285	0.94634	0.36747	0.02464	1.18823
1.2	-0.28737	-0.17260	0.93783	1.18342	-0.71573	-0.57450	-0.25886	0.91712	0.52158	0.04156	1.29111
1.3	-0.36496	-0.23760	0.90727	1.27320	-0.83753	-0.72950	-0.35631	0.87638	0.72057	0.06724	1.43498
1.4	-0.45515	-0.31933	0.86575	1.35821	-0.96746	-0.90954	-0.47883	0.82102	0.97317	0.10504	1.63125
1.5	-0.55870	-0.42039	0.81054	1.43680	-1.10468	-1.11609	-0.63027	0.74745	1.28938	0.15916	1.89349
1.6	-0.67629	-0.54348	0.73859	1.50695	-1.24808	-1.35042	-0.81466	0.65156	1.68091	0.23497	2.23776
1.7	-0.80848	-0.69144	0.64637	1.56621	-1.39623	-1.61346	-1.03616	0.52871	2.16145	0.33904	2.68296
1.8	-0.95564	-0.86715	0.52997	1.61162	-1.54728	-1.90577	-1.29909	0.37368	2.74734	0.47951	3.25143
1.9	-1.11796	-1.07357	0.38503	1.63969	-1.69889	-2.22745	-1.60770	0.18071	3.45833	0.66632	3.96945
2.0	-1.29535	-1.31361	0.20676	1.64628	-1.84818	-2.57798	-1.96620	-0.05652	4.31831	0.91158	4.86824
2.2	-1.69334	-1.90567	-0.27087	1.57538	-2.12481	-3.35952	-2.84858	-0.69158	6.61044	1.63962	7.36356
2.4	-2.14117	-2.66329	-0.94885	1.35201	-2.33901	-4.22811	-3.97323	-1.59151	9.95510	2.82366	11.13130
2.6	-2.62126	-3.59987	-1.87734	0.91679	-2.43695	-5.14023	-5.35541	-2.82106	14.86800	4.70118	16.74660
2.8	-3.10341	-4.71748	-3.10791	0.19729	-2.34558	-6.02299	-6.99007	-4.44491	22.15710	7.62658	25.06510
3.0	-3.54058	-5.99979	-4.68788	-0.89126	-1.96928	-6.76460	-8.84029	-6.51972	33.08790	12.13530	37.38070
3.5	-3.91921	-9.54367	-10.34040	-5.85402	1.07408	-6.78895	-13.69240	-13.82610	92.20900	36.85800	101.36900
4.0	-1.61428	-11.7307	-17.91860	-15.07550	9.24368	-0.35762	-15.61050	-23.14040	266.06100	109.01200	279.99600

续表

换算深度 $\bar{h}=\alpha y$	$A_2B_4-A_4B_2$	$A_3D_4-A_4D_3$	$A_2D_4-A_4D_2$	$A_3C_4-A_4C_3$	$A_2C_4-A_4C_2$	$A_f=\frac{B_3D_4-B_4D_3}{A_3B_4-A_4B_3}$	$B_f=\frac{A_3D_4-A_4D_3}{A_3B_4-A_4B_3}$	$C_f=\frac{A_3C_4-A_4C_3}{A_3B_4-A_4B_3}$	$\frac{B_2D_1-B_1D_2}{A_2B_1-A_1B_2}$	$\frac{A_2D_1-A_1D_2}{A_2B_1-A_1B_2}$	$\frac{A_2C_1-C_2A_1}{A_2B_1-A_1B_2}$
0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	∞	∞	∞	0.00000	0.00000	0.00000
0.1	0.00500	0.00033	0.00003	0.00500	0.00050	1800.00	24000.00	36000.00	0.00033	0.00500	0.10000
0.2	0.02000	0.00267	0.00033	0.02000	0.00400	450.00	3000.000	22500.10	0.00269	0.02000	0.20000
0.3	0.04500	0.00900	0.00169	0.04500	0.01350	200.00	888.898	4444.590	0.00900	0.04500	0.30000
0.4	0.07999	0.02133	0.00533	0.08001	0.03200	112.502	375.017	1406.444	0.02133	0.07999	0.39996
0.5	0.12504	0.04167	0.01302	0.12505	0.06251	72.102	192.214	576.825	0.04165	0.12495	0.49988
0.6	0.18013	0.07203	0.02701	0.18020	0.10804	50.012	111.179	278.134	0.07192	0.17893	0.59962
0.7	0.24535	0.11443	0.05004	0.24559	0.17161	36.740	70.001	150.236	0.11406	0.24448	0.69902
0.8	0.32091	0.17094	0.03539	0.32150	0.25632	28.108	46.884	88.179	0.16985	0.31867	0.79783
0.9	0.40709	0.24374	0.13685	0.40842	0.36533	22.245	33.009	55.312	0.24092	0.40199	0.89562
1.0	0.50436	0.33507	0.20873	0.50714	0.50194	18.028	24.102	36.480	0.32855	0.49374	0.99179
1.1	0.61351	0.44739	0.30600	0.61893	0.66965	14.915	18.160	25.122	0.43351	0.59294	1.08560
1.2	0.73565	0.58346	0.43412	0.74562	0.87232	12.550	14.039	17.941	0.55589	0.69811	1.17605
1.3	0.87244	0.74650	0.59910	0.88991	1.11429	10.716	11.102	13.235	0.69488	0.80737	1.26199
1.4	1.02612	0.94032	0.80887	1.05550	1.40059	9.265	8.952	10.049	0.84855	0.91831	1.34213
1.5	1.19981	1.16960	1.07061	1.24752	1.73720	8.101	7.349	7.838	1.01382	1.02816	1.41516
1.6	1.39771	1.44015	1.39379	1.47277	2.13135	7.154	6.129	6.268	1.18632	1.13380	1.47990
1.7	1.62522	1.75934	1.78918	1.74019	2.59200	6.375	5.189	5.133	1.36088	1.23219	1.53540
1.8	1.88946	2.13653	2.26933	2.06147	3.13039	5.730	4.456	4.300	1.53179	1.32058	1.58115
1.9	2.19944	2.58362	2.84909	2.45147	3.76049	5.190	3.878	3.680	1.69343	1.39688	1.61718
2.0	2.56664	3.11583	3.54638	2.92905	4.49999	4.737	3.418	3.213	1.84091	1.43979	1.64405
2.2	3.53366	4.51846	5.38469	4.24806	6.40196	4.032	2.756	2.591	2.08041	1.54549	1.67490
2.4	4.95288	6.57004	8.02219	6.28800	9.09220	3.526	2.327	2.227	2.23974	1.58566	1.68520
2.6	7.07178	9.62890	11.82060	9.46294	12.97190	3.161	2.048	2.013	2.32965	1.59617	1.68665
2.8	10.26420	14.25710	17.33620	14.40320	18.66360	2.905	1.869	1.889	2.37119	1.59262	1.68717
3.0	15.09220	21.32850	25.42750	22.06800	27.12570	2.727	1.758	1.818	2.38547	1.58606	1.69051
3.5	41.01820	60.47600	67.49820	64.76960	72.04850	2.502	1.641	1.757	2.38891	1.58435	1.71100
4.0	114.7220	176.7060	185.9960	190.8340	200.0470	2.441	1.625	1.751	2.40074	1.59979	1.73218

注 表中 y 为桩身计算截面的深度；α 为桩的水平变形系数。

表 9-77　　桩身最大弯矩截面系数 C_{I}、最大弯矩系数 D_{II}

换算深度 $\bar{h}=\alpha y$	C_{I}						D_{II}					
	$\alpha h=4.0$	$\alpha h=3.5$	$\alpha h=3.0$	$\alpha h=2.8$	$\alpha h=2.6$	$\alpha h=2.4$	$\alpha h=4.0$	$\alpha h=3.5$	$\alpha h=3.0$	$\alpha h=2.8$	$\alpha h=2.6$	$\alpha h=2.4$
0.0	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
0.1	131.252	129.489	120.507	112.954	102.805	90.196	131.250	129.551	120.515	113.017	102.839	90.226
0.2	34.186	33.699	31.158	29.090	26.326	22.939	34.315	33.818	31.282	29.218	26.451	23.065
0.3	15.544	15.282	14.013	13.003	11.671	10.064	15.738	15.476	14.206	13.197	11.864	10.258
0.4	8.781	8.605	7.799	7.176	6.368	5.409	9.039	8.862	8.057	7.434	6.625	5.667
0.5	5.539	5.403	4.821	4.385	3.829	3.183	5.855	5.720	5.138	4.702	4.147	3.502
0.6	3.710	3.597	3.141	2.811	2.400	1.931	4.086	3.973	3.519	3.189	2.778	2.310
0.7	2.566	2.465	2.089	1.826	1.506	1.150	2.999	2.899	2.525	2.263	1.943	1.587
0.8	1.791	1.699	1.377	1.160	0.902	0.623	2.282	2.191	1.871	1.655	1.398	1.119
0.9	1.238	1.151	0.867	0.683	0.471	0.248	1.784	1.698	1.417	1.235	1.024	0.800
1.0	0.824	0.740	0.484	0.327	0.149	−0.032	1.425	1.342	1.091	0.934	0.758	0.577
1.1	0.503	0.420	0.187	0.049	−0.100	−0.247	1.157	1.077	0.848	0.713	0.564	0.416
1.2	0.246	0.163	−0.052	−0.172	−0.299	−0.418	0.952	0.873	0.664	0.546	0.420	0.299
1.3	0.034	−0.049	−0.249	−0.355	−0.465	−0.557	0.792	0.714	0.522	0.418	0.311	0.212
1.4	−0.145	−0.229	−0.416	−0.508	−0.597	−0.672	0.666	0.588	0.410	0.319	0.229	0.148
1.5	−0.299	−0.384	−0.559	−0.639	−0.712	−0.769	0.563	0.486	0.321	0.241	0.166	0.101
1.6	−0.434	−0.521	−0.634	−0.753	−0.812	−0.853	0.480	0.402	0.250	0.181	0.118	0.067
1.7	−0.555	−0.645	−0.796	−0.854	−0.898	−0.025	0.411	0.333	0.193	0.134	0.082	0.043
1.8	−0.665	−0.756	−0.896	−0.943	−0.975	−0.987	0.353	0.276	0.147	0.097	0.055	0.026
1.9	−0.768	−0.862	−0.988	−1.024	−1.043	−1.043	0.304	0.227	0.110	0.068	0.035	0.014
2.0	−0.865	−0.961	−1.073	−1.098	−1.105	−1.092	0.263	0.186	0.081	0.046	0.022	0.007
2.2	−1.048	−1.148	−1.225	−1.227	−1.210	−1.176	0.196	0.122	0.040	0.019	0.006	0.001
2.4	−1.230	−1.328	−1.360	−1.338	−1.299	0	0.145	0.075	0.016	0.005	0.001	0
2.6	−1.420	−1.507	−1.482	−1.43	0		0.106	0.043	0.005	0.001	0	
2.8	−1.635	−1.692	−1.593	4			0.074	0.021	0.001	0		
3.0	−1.893	−1.886	0	0			0.049	0.008	0			
3.5	−2.994	0					0.010	0				
4.0	0						0					

注　表中 α 为桩的水平变形系数，m^{-1}；y 为桩身计算截面的深度，m；h 为桩长，m。当 $\alpha h>4.0$ 时，按 $\alpha h=4.0$ 计算。

为方便编制程序，给出影响函数的幂级数表达式结果如下

$$\begin{cases} x = x_0A_1 + \dfrac{\varphi_0}{\alpha}B_1 + \dfrac{M_0}{\alpha^2EI}C_1 + \dfrac{Q_0}{\alpha^3EI}D_1 \\ \dfrac{\varphi}{\alpha} = x_0A_2 + \dfrac{\varphi_0}{\alpha}B_2 + \dfrac{M_0}{\alpha^2EI}C_2 + \dfrac{Q_0}{\alpha^3EI}D_2 \\ \dfrac{M}{\alpha^2EI} = x_0A_3 + \dfrac{\varphi_0}{\alpha}B_3 + \dfrac{M_0}{\alpha^2EI}C_3 + \dfrac{Q_0}{\alpha^3EI}D_3 \\ \dfrac{Q}{\alpha^3EI} = x_0A_4 + \dfrac{\varphi_0}{\alpha}B_4 + \dfrac{M_0}{\alpha^2EI}C_4 + \dfrac{Q_0}{\alpha^3EI}D_4 \end{cases} \quad (9\text{-}244)$$

其中，影响函数值 A_i、B_i、C_i、D_i 可以通过求解 $A(\alpha y,i,j)$ 的值得到［见式（9-245）］，根据式（9-244）即可以求得弹性桩任意深度的水平位移、转角、弯矩和剪力。

$A(\alpha y,i,j)$ 为与 αy 有关的系数，其中，$\alpha=\sqrt[5]{\dfrac{mb_0}{EI}}$，$A(\alpha y,i,j)$ 与 A_i、B_i、C_i、D_i 的对照关系见表 9-78。

表 9-78 $A(\alpha y,i,j)$ 与 A_i、B_i、C_i、D_i 的对照表

A_1	B_1	C_1	D_1	A_2	B_2	C_2	D_2
$A(\alpha y$, 1, 1)	$A(\alpha y$, 1, 2)	$A(\alpha y$, 1, 3)	$A(\alpha y$, 1, 4)	$A(\alpha y$, 2, 1)	$A(\alpha y$, 2, 2)	$A(\alpha y$, 2, 3)	$A(\alpha y$, 2, 4)
A_3	B_3	C_3	D_3	A_4	B_4	C_4	D_4
$A(\alpha y$, 3, 1)	$A(\alpha y$, 3, 2)	$A(\alpha y$, 3, 3)	$A(\alpha y$, 3, 4)	$A(\alpha y$, 4, 1)	$A(\alpha y$, 4, 2)	$A(\alpha y$, 4, 3)	$A(\alpha y$, 4, 4)

$$A(\alpha y,i,j) = S(i,j)(\alpha y)^{j-i} + \sum_{k=1}^{n}(-1)^{k} \frac{M[k,(5-j)]}{(5k+j-i)!}(\alpha y)^{5k+j-i} \quad (9\text{-}245)$$

$$S(i,j)=\begin{cases} \dfrac{1}{(j-i)!} & j>i \\ 1 & j=i \\ 0 & j<i \end{cases} \quad (9\text{-}246)$$

$$M(k,T)=(5k-T)[5(k-1)-T][5(k-2)-T]\cdots(5\times2-T)(5\times1-T) \quad (9\text{-}247)$$

$$A!=A(A-1)(A-2)\cdots2\times1 \quad (9\text{-}248)$$

$$T=5-j \quad (9\text{-}249)$$

式中 n——项数，精确值时取 $n=\infty$，因阶乘倒数收敛很快，一般取 $n=4\sim5$ 即可。

根据表 9-78 和式（9-244）～式（9-249）很容易编制程序求解得到影响函数值形成表 9-76 和表 9-77，求解过程此处从略。

（八）桩身承载力与裂缝控制计算

在架空输电线路灌注桩基础设计中，桩身承载力计算主要指桩身正截面受弯承载力和斜截面受剪承载力。桩身承载力和上拔桩的裂缝控制计算均应按照现行 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》计算。此处从略。

（九）承台计算

承台受弯、受冲切、受剪和局部受压计算按 JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》执行。此处从略。

（十）桩基竖向抗压或抗拔抗震承载力验算

1. 非液化土中桩基竖向抗震承载力验算

（1）下压时，在地震作用效应和荷载效应标准组合下，依据式（9-228）和式（9-229）进行非液化土中桩基竖向下压抗震承载力验算。

（2）上拔时，在地震作用效应组合下，依据式（9-235）～式（9-237）进行非液化土中桩基竖向上拔抗震承载力验算。

2. 液化土中桩基竖向抗震承载力验算

（1）桩基竖向抗震承载力验算公式同上条所述，但是，应按照以下（2）中所述两类情况分别验算。在依据式（9-235）～式（9-237）进行非液化土中桩基竖向上拔抗震承载力验算时，应同时扣除 G_p 和 G_{gp} 中液化土层的土重。

（2）对于桩身周围有液化土层的桩基，按下列两类情况分别进行抗震验算，并按不利情况设计：

1）地震作用按全部地震作用采用，将液化土层极限侧阻力标准值乘以土层液化折减系数计算单桩极限承载力标准值。土层液化折减系数 ψ_L 按表 9-79 确定。

2）地震作用按水平地震影响系数最大值的 10%采用，计算单桩极限承载力标准值时应扣除液化土层的桩周摩阻力，同时，对低承台桩基应扣除承台底面以下 2.0m 深度范围内非液化土层的桩周摩阻力，对高承台桩基及单桩应扣除设计地面以下 3.0m 深度范围内非液化土层的桩周摩擦阻力。

表 9-79 土层液化折减系数 ψ_L

序号	$\lambda_N=N_{63.5}/N_{cr}$	自设计地面算起的液化土层深度 d_L（m）	ψ_L
1	$\lambda_N \leqslant 0.6$	$d_L \leqslant 10$	0
		$10 < d_L \leqslant 20$	1/3
2	$0.6 < \lambda_N \leqslant 0.8$	$d_L \leqslant 10$	1/3
		$10 < d_L \leqslant 20$	2/3

续表

序号	$\lambda_N = N_{63.5} / N_{cr}$	自设计地面算起的液化土层深度 d_L（m）	ψ_L
3	$0.8 < \lambda_N \leqslant 1.0$	$d_L \leqslant 10$	2/3
		$10 < d_L \leqslant 20$	1.0

注 1. $N_{63.5}$ 为饱和土标准贯入击数实测值；N_{cr} 为液化判别标准贯入击数临界值。
2. 对低承台桩基，当承台底面上、下分别有厚度不小于1.5、1.0m 的非液化土或非软弱土时，ψ_L 可按表中取值；当无法满足时，应按表中数值降低一档采用。
3. 对高承台桩基及单桩，当自设计地面向下有厚度不小于 3.0m 的非液化土或非软弱土覆盖层时，ψ_L 可按表中取值；当无法满足时，应按表中数值降低一档采用。

（十一）桩基水平抗震承载力验算

（1）桩基水平抗震承载力验算，应按下式进行桩基截面抗震验算：

$$S \leqslant R / \gamma_{RE} \qquad (9\text{-}250)$$

式中 S——地震作用效应和其他荷载效应的基本组合下，桩身内力组合的设计值，kN；

R——桩身承载力设计值，kN；

γ_{RE}——承载力抗震调整系数，按偏拉构件考虑取 0.85。

（2）桩身内力和位移计算方法见上文“（七）水平承载力和位移计算（单桩和群桩基础）”中相关内容。对于桩身周围有液化土层的桩基，应按上文“（十）桩基竖向抗压或抗拔抗震承载力验算”中液化土中抗震承载力验算的两类情况（第一类采用全部地震作用，第二类采用水平地震影响系数最大值的 10%的地震作用）分别进行抗震验算，并按不利情况设计，其水平荷载作用下桩身内力和位移计算的计算参数和图式尚应满足以下相关要求：

1）当按第一类情况验算时，当自设计地面（低承台桩基自桩顶）向下深度（当此深度超过桩底深度时，取桩底深度）范围内存在液化影响折减系数为 0 的液化层时，应扣除该类土层的水平抗力，可把上述范围内的其他土层向下平移。对低承台桩基承台侧的非液化化土层，可随之下移。下移后，以新设计地面为基准，在上述深度范围仍存在液化影响折减系数为 0 的液化层时，可按前述方法继续下移，直至满足。

2）当按第二类情况验算时，当自设计地面（低承台桩基自桩顶）向下深度（当此深度超过桩底深度时，取桩底深度）范围内存在液化层时，应扣除该类土层的水平抗力，同时按以上方式进行土层下移。

3）当承台底面以上土层为液化层时，不考虑承台侧面土体的弹性抗力和承台底土的竖向弹性抗力与摩阻力，此时，令承台侧面地基土水平抗力系数 $C_n=0$、承台底地基土竖向抗力系数 $C_b=0$，可按高承台桩基公式计算；

4）当承台底面以上为非液化层，而承台底面与承台底面下土体可能发生脱离时（承台底面以下有自重固结、自重湿陷、震陷、液化土层时），不考虑承台底地基土的竖向弹性抗力和摩阻力，只考虑承台侧面土体的弹性抗力，宜按高承台桩基图式进行计算，但计算承台单位变位引起的桩顶及承台的反力和时，应考虑承台侧面土体弹性抗力的影响，可按低承台桩基的公式计算，对应的承台底地基土竖向抗力系数 $C_b=0$；

5）当桩顶以下 2（d+1）m 深度内有液化土层时，其水平抗力系数的比例系数综合计算值 m，系将各液化层的 m 值按表 9-79 折减后，代入式（9-238）或式（9-239）中计算确定。

三、挖孔桩基础

（一）适用条件

灌注桩成孔工艺有钻孔、人工挖孔、抓掘成孔、螺旋成孔、沉管成孔和冲孔等。对于现在的输电线路工程来说，挖孔桩指的是利用人工挖孔或机械洛阳铲、旋挖钻机成孔的灌注桩。挖孔桩的施工不需要笨重的钻机进场施工，对施工道路的要求也比较低，并且挖孔桩能够通过扩底增加桩的抗拔、抗压承载力，因而遇到荒山僻野、人烟稀少、交通不便等地区，如果是地下水埋藏比较深的粉土、黏性土或岩石类地基条件的话，挖孔桩将是输电杆塔的一种特别适合的基础型式。

（二）基本构造

（1）人工挖孔桩的孔径（不含护壁）不得小于0.8m，且不宜大于 2.5m，孔深不宜大于 15m。使用机械洛阳铲或旋挖钻机成孔时，孔径、孔深应根据设备工艺参数确定。

（2）挖孔桩埋深不宜小于 6.0m。

（3）桩的中心间距一般不小于其设计直径的 3 倍，同时要求中心间距不小于 1.5D（当 D 不大于 2.0m 时，D 为扩大端设计直径）或 D+1.5（当 D 大于 2.0m 时），挖孔桩的扩大端净距不应小于 0.5m。

（4）挖孔桩扩底端直径与桩身直径比 D/d，应根据承载力要求及扩底端部侧面和桩端持力层土性特征以及扩底施工方法确定，挖孔桩的 D/d 不应大于 3，钻孔桩的 D/d 不应大于 2.5；扩底端侧面的斜率应根据实际成孔及土体自立条件确定。a/h_c 可取 1/4～1/2，砂土可取 1/4，粉土、黏性土可取 1/3～1/2。扩底端底面可为平底或锅底形，当为锅底形时，矢高 h_b 可取 0.15～0.20D，通常取值为 200mm。挖孔桩扩底构造

示意图如图 9-55 所示。

（5）主筋保护层厚度在无地下水、有护壁时不应小于 35mm，有地下水、无护壁时，不应小于 50mm。

（6）应根据计算确定桩身正截面配筋率，最小配筋率不应小于 0.3%，主筋应沿桩身截面周边均匀布置。桩身主筋应等截面或变截面通常配置，净距不应小于 60mm，且不宜大于 300mm。

（7）箍筋应采用螺旋式，直径不应小于主筋直径的 1/4 且不应小于 8mm，间距宜为 200～300mm，对于承受较大水平荷载或处于抗震设防烈度大于等于 8 度地区的桩，箍筋直径不应小于 10mm；桩顶部 3～5 倍桩径范围内（桩径小取大值，桩径大取小值）箍筋间距加密至 100mm；当钢筋笼长度超过 4m 时，应每隔 2m 设一道直径为 18～25mm 的焊接加劲箍筋。

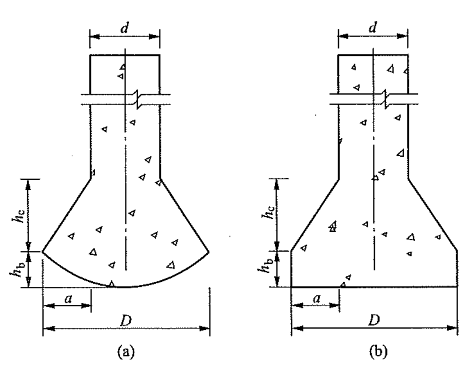


图 9-55 挖孔桩扩底构造示意图

（a）锅底型；（b）平底型

（8）挖孔桩基础应设计护壁，护壁从地面开始设置直到扩底位置。护壁厚度及护壁配筋应符合下列规定：

1）当桩身直径不大于 1.5m 时，混凝土护壁厚度不宜小于 100mm，护壁应配置直径不小于 8mm 的环形和竖向构造钢筋，钢筋水平和竖向间距不宜大于 200mm，钢筋应设于护壁混凝土中间，竖向钢筋应上下搭接或焊接；

2）当桩身直径大于 1.5m 且小于 2.5m 时，混凝土护壁厚度宜为 120～150mm；应在护壁厚度方向配置双层直径为 8mm 的环形和竖向构造钢筋，钢筋水平和竖向间距不宜大于 200mm，竖向钢筋应上下搭接或焊接；

3）当桩身直径大于等于 2.5m 且小于 4m 时，混凝土护壁厚度宜为 200mm，应在护壁厚度方向配置双层直径为 8mm 的环向和竖向构造钢筋，钢筋水平和竖向间距不宜大于 200mm，竖向钢筋应上下搭接或焊接；

4）第一节护壁井圈应高于场地地面 100～150mm，第一节井圈的壁厚应比下一节井圈的壁厚加厚 100～150mm，并按规定配置构造钢筋。

（9）挖孔桩桩身混凝土的强度等级不应低于 C25；护壁混凝土强度等级不宜低于桩身混凝土的强度等级。

（三）下压承载力、上拔承载力、水平承载力和位移及桩基本体计算

挖孔桩基础的下压承载力、上拔承载力、水平承载力和位移及桩基本体计算同钻孔灌注桩基础的计算方法类似，此处不再赘述，但须注意以下几点：

（1）桩的计算保护距离（计算埋深及计算外露高度的起算点距桩心距离）取 2.5 倍桩径，扩底桩同时应满足不小于 1.5D（D 扩大头直径）的要求，见图 9-56 所示。

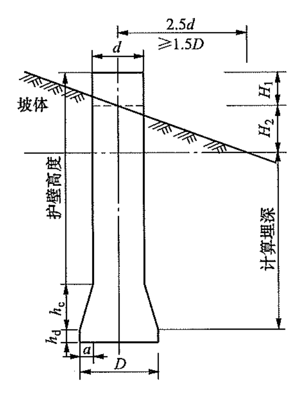


图 9-56 挖孔桩基础计算示意图

（2）计算上拔承载力时，考虑自桩底起算的扩大头影响高度为 4～10 倍桩身直径，该影响高度按内摩擦角增大而增加，对于卵石、砾石取高值，实际工程中扩大头影响高度常取 4 倍的桩身直径。

（3）计算下压承载力时，扩大头斜面及变截面以上 2d 长度范围内不应计入桩侧阻力（d 为桩身直径），当扩底桩埋深小于 6.0m 时，不宜计入桩侧阻力。

（4）应采用基础作用力的标准值计算挖孔桩在设计地面处的水平变位，并满足相关限值要求。

四、单桩的静载试验要点

（一）单桩竖向抗压静载试验

1. 试验目的

确定单桩竖向抗压极限承载力，判定竖向抗压承载力是否满足设计要求，验证高应变法的单桩竖向抗压承载力检测结果。当在桩身内埋设传感器，测试桩身内力及变形，可测定桩周各土层的抗压摩擦阻力及桩端阻力。

2. 试验加荷装置

一般采用油压千斤顶加载，加载的反力装置可根

据现场条件，按下列三种形式采用。

（1）锚桩横梁反力装置：应验算锚桩抗拔力，且其应大于设计最大加载时作用在锚桩平均上拔力的 1.2 倍，当采用工程桩作为锚桩时，应监测锚桩上拔量。

（2）压重平台反力装置：所加重物应均匀稳固地放置于平台上，且应大于设计最大加载量的 1.2 倍，宜在检测前一次加足，施加于地基的压应力不宜大于地基承载力特征值的 1.5 倍。

（3）锚桩压重联合反力装置：当试桩最大加荷重力超过锚桩的抗拔能力时，可在横梁上放置或悬挂一定量的重物，由锚桩和重物共同承担千斤顶的加荷反力。

下压静载试验装置如图 9-57 所示。

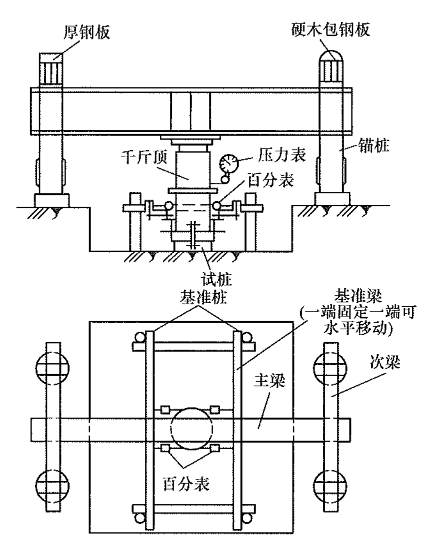


图 9-57　下压静载试验装置示意图

3. 荷载、沉降量和锚桩上拔量量测仪表

（1）荷载：可用放置于千斤顶上的应力环、应变式压力传感器直接测定。当采用两台及两台以上千斤顶加载时，应使用同型号和规格的千斤顶，并联同步工作，并使千斤顶的合力通过试桩中心。荷载测量宜用并联于油路的压力传感器测定油压，传感器的测量误差不应大于 1%。

（2）沉降量及锚桩上拔量：桩顶、桩端沉降量及锚桩上拔量量测宜采用位移传感器或大量程百分表，传感器分辨率优于或等于 0.01mm。桩顶沉降量测时应在同一水平面内两个正交直径方向上对称布置 4 个量测仪表，测定平面宜在桩顶 200mm 以下位置。桩身截面位移测量可在桩身内埋设测管，测管中内置测杆。

4. 桩间距的规定

试桩、锚桩或压重平台支墩边和基准梁之间的中心距应符合表 9-80 的规定。

表 9-80　试桩、锚桩或压重平台支墩边和基准梁之间的中心距

反力装置＼距离	试桩中心与锚桩中心或压重平台支墩边	试桩中心与基准桩中心	基准桩中心与锚桩中心或压重平台支墩边
锚桩横梁	≥4（3）D，且＞2.0m	≥4（3）D，且＞2.0m	≥4（3）D，且＞2.0m
压重平台	≥4D，且＞2.0m	≥4（3）D，且＞2.0m	≥4D，且＞2.0m

注　1. D 为试桩或锚桩的设计直径或边宽；
2. 试桩或锚桩为扩底桩或多支盘桩时，试桩与锚桩的中心距不应小于 2 倍扩大端直径；
3. 括号内数值可用于工程桩验收检测时多排桩基础设计桩中心距离小于 4D 或压重平台法支墩下 2～3 倍宽影响范围内的地基土已进行加固处理的情况。

5. 试桩制作要求

（1）试桩顶部一般应予加强，可在桩顶配置加密钢筋网 2～3 层，或以薄钢板圆筒做成加劲箍与桩顶混凝土浇成一体，用高标号砂浆将桩顶抹平。

（2）为安置沉降测点和仪表，试桩顶部露出试坑地面的高度不宜小于 60cm，试坑地面与桩承台底设计标高一致。

（3）试桩成桩工艺和质量控制标准应与工程桩一致。为了缩短试桩养护时间，可适当提高混凝土强度等级，或掺入早强剂。

6. 浇筑混凝土后的间隙时间

从浇注试桩混凝土到开始试验的间隙时间，在满足混凝土的设计强度等级的前提下，对砂类土，不应少于 10d；对一般黏性土，不应少于 20d；对淤泥或淤泥质土的灌注桩，不应少于 30d。

7. 加荷方式

为设计提供依据的单桩竖向抗压静载试验应采用慢速维持荷载法；当工程设计有特殊要求时，也可采用多循环加、卸载法等其他方法。工程桩验收检测宜采用慢速维持荷载法，当有成熟的地区经验时，也可采用快速维持荷载法。快速维持荷载法每级荷载维持时间不得少于 1h。

8. 慢速维持荷载法加、卸载和沉降观测标准

（1）加载应分级进行，采用逐级等量加载；每级加载量为预估最大加载量的 1/10～1/12，其中第一级可取分级荷载的 2 倍。每级荷载在维持过程中的变化幅度不得超过分级荷载的±5%。

（2）每级荷载施加后，按第 5min、第 15min、第

30min、第 45min、第 60min 测读桩顶沉降量，以后每隔 30min 测读一次，每次测读值记入试验记录，见表 9-81。当沉降速率达到相对稳定标准时，即可施加下一级荷载。

表 9-81　　单桩竖向静载试验原始记录表

主要仪器设备编号：			工程名称：						
试验项目：		□抗压		□抗拔		桩号：			
时间（min）	级	荷载（kN）	位移读数（mm）				平均（mm）	位移差（mm）	累计（mm）
			位移 1	位移 2	位移 3	位移 4			
测试时间：		校核：		记录：					

（3）沉降相对稳定标准：每 1 小时的桩顶沉降量不超过 0.1mm，并连续出现两次（从分级荷载施加后的第 30min 开始，按 1.5h 连续三次每 30min 的沉降观测值计算）。

（4）卸载应分级进行，采用逐级等量卸载，每级卸载量取加载时分级荷载 2 倍。

（5）每级荷载卸载后，按第 15min、第 30min、第 60min 测读桩顶沉降量后，即可卸载下一级荷载，卸载至零后，测读桩顶残余沉降量，维持时间为 3h，测读时间为第 15min、第 30min，以后每隔 30min 测读一次。

（6）终止试验加载应符合下列要求之一：

1）某级荷载作用下，桩顶沉降量大于前一级荷载作用下沉降量的5倍。当桩顶沉降量能相对稳定且总沉降量小于40mm时，宜加载至桩顶总沉降量超过40mm；

2）某级荷载作用下，桩顶沉降量大于前一级荷载作用下沉降量的2倍，且经24h尚未达到相对稳定标准；

3）达到反力装置的最大加载量或设计要求的最大加载量，且沉降量已达到相对稳定标准；

4）已达到桩身材料的极限强度或桩身已出现明显破损；

5）当工程桩作为锚桩时，锚桩上拔量已达到允许值；

6）当荷载-沉降曲线呈缓变型时，可加载至桩顶总沉降量超过60～80mm；也可根据具体要求加载至桩顶总沉降量超过80mm。

9. 检测数据的整理要求

（1）确定单桩竖向抗压极限承载力时，应绘制竖向荷载-沉降（Q-s）、沉降-时间（s-lg$t$）关系曲线，需要时也可绘制其他辅助分析所需曲线；

（2）当进行桩身应力、应变和桩底反力测试时，应绘制桩身轴力分布图，计算桩周不同岩土层的侧阻力值和端阻力值。

10. 单桩竖向抗压极限承载力的确定

（1）对于陡降型 Q-s 曲线，取其发生明显陡降的起始点对应的荷载值。

（2）可取 s-lg$t$ 曲线尾部出现明显向下弯曲的前一级荷载值。

（3）当出现某级荷载作用下，桩顶沉降量大于前一级荷载作用下沉降量的2倍，且经24h尚未达到相对稳定标准时，可取前一级荷载。

（4）对于缓变型 Q-s 曲线的桩，宜取 s=40mm 对应的荷载值；当桩长大于 40m 时，宜考虑桩身弹性压缩量；对于直径大于或等于 800mm 的桩，可取 s=0.05D 对应的荷载值，其中 D 为桩端直径。

（5）当按上述四款判定桩的竖向抗压承载力未达到极限时，桩的竖向抗压极限承载力应取最大试验荷载值。

（6）当最大加载量已达到桩身材料的极限强度和桩顶出现明显破坏现象时，可取最大加载量的前一级荷载值。

（7）为设计提供依据的试验桩竖向抗压极限承载力统计值应根据岩土条件、施工情况等综合确定，并应符合下列要求：

1）试桩条件基本相同的试验桩数量不少于3根，且满足极差不超过平均值的30%时，应取其平均值为单桩竖向抗压极限承载力的统计值。

2）当极差超过平均值的30%时，应分析极差过大的原因，结合工程实际情况确定，必要时增加试桩的数量。

（8）单桩竖向抗压承载力特征值应按单桩竖向抗压极限承载力的一半取值。

（二）单桩竖向抗拔静载试验

1. 试验目的

确定单桩竖向抗拔极限承载力，判定竖向抗拔承载力是否满足设计要求，通过桩身内力及变形测试，测定桩周各土层的抗拔摩擦阻力。

2. 试验加荷装置

一般采用横梁式的千斤顶加荷装置，对工程验收亦可采用绞磨、链式起重器或汽车吊等加荷方式。

上拔静载试验装置如图9-58所示。

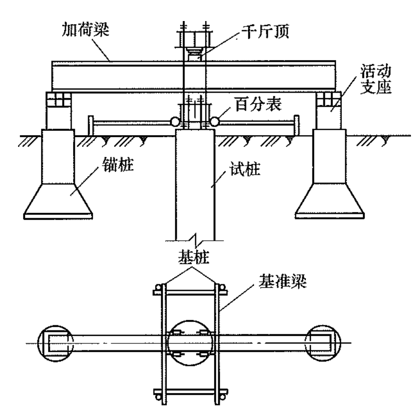


图9-58　上拔静载试验装置示意图

3. 试验设备及仪器的安装要求

（1）试验反力装置宜采用反力桩或天然地基提供支座反力，反力架系统应具有1.2倍的安全系数。采用反力桩（或工程桩）提供支座反力时，反力桩顶面应平整并具有一定的强度。采用天然地基提供反力时，施加于地基的压应力不宜超过地基承载力特征值的1.5倍，反力梁的支点重心应与支座中心重合。

（2）基准梁安装要求，试验桩、支座和基准梁之间的中心距同单桩竖向抗压静载试验的相关规定。

（3）桩顶上拔量量测宜采用位移传感器或大量程百分表，传感器分辨率优于或等于0.01mm。上拔量测试平面宜布置在桩顶或桩身，并应避开主筋。

（4）加载装置和荷载量测仪器安装要求同单桩竖向抗压静载试验的相关规定。

（5）试验前后，应采用低应变动测法对试桩的桩身完整性进行检测。为设计提供依据的灌注桩，施工时应进行成孔质量检测；对有接头的预制桩，应进行接头抗拉强度验算。

4. 试验加荷方式和终止加载的要求

（1）单桩竖向抗拔静载试验可采用慢速维持荷

载法，当工程设计有特殊要求时，也可采用多循环加载、卸载等其他方法。采用慢速维持荷载法时，加载、卸载和竖向上拔量观测应符合单桩竖向抗压静载试验的相关规定，并应注意观测桩身外露部分混凝土的开裂情况。

（2）终止试验加载应符合下列要求之一：

1）某级荷载作用下，桩顶上拔量大于前一级上拔荷载作用下上拔量的 5 倍；

2）桩顶累计上拔量超过 100mm 时；

3）桩顶上拔荷载达到钢筋强度设计值，或某根钢筋拉断；

4）达到设计要求的最大上拔荷载值。

5. 上拔静载试验数据整理

数据整理应绘制上拔荷载—桩顶上拔量（U—δ）关系曲线和桩顶上拔量—时间对数（δ—lg$t$）关系曲线。

6. 单桩竖向抗拔极限承载力的确定

（1）对陡变型 U—δ 曲线，取陡升起始点对应的荷载值。

（2）对缓变型 U—δ 曲线，取 δ—lg$t$ 曲线斜率明显变陡或曲线尾部明显弯曲的前一级荷载值。

（3）抗拔钢筋断裂时前一级荷载值。

（4）当工程桩验收检测的受检桩在最大上拔荷载作用下，未出现上述三款情况时，单桩竖向抗拔极限承载力应取下列情况之一对应的荷载值。

1）设计要求最大上拔量控制值对应的荷载；

2）设计要求的最大施加荷载；

3）钢筋应力达到强度设计值时对应的荷载。

（5）为设计提供依据的试验桩竖向抗压极限承载力统计值应根据岩土条件、施工情况等综合确定，并应符合下列要求：

1）试桩条件基本相同的试验桩数量不少于 3 根，且满足极差不超过平均值的 30%时，应取其平均值为单桩竖向抗压极限承载力的统计值；

2）当极差超过平均值的 30%时，应分析极差过大的原因，结合工程实际情况确定，必要时增加试桩的数量。

（6）单桩竖向抗拔承载力特征值应按单桩竖向抗拔极限承载力的一半取值。当工程桩不允许带裂缝工作时，取桩身开裂的前一级荷载作为单桩竖向抗拔承载力特征值，并与按极限荷载一半取值确定的承载力特征值相比取小值。

（三）单桩水平静载试验

1. 试验目的

确定单桩水平临界荷载和极限承载力，推定土抗力参数，判定水平承载力是否满足设计要求，通过桩身内力及变形测试，测定桩身弯矩和挠曲。

2. 试验加荷装置

水平推力加载装置宜采用油压千斤顶，在千斤顶与试桩接触处宜安置一球形铰座，以保证千斤顶作用力能水平通过桩身轴线。加载能力不得小于最大试验荷载的 1.2 倍。水平力作用线应通过地面标高处。

水平静载试验装置如图 9-59 所示。

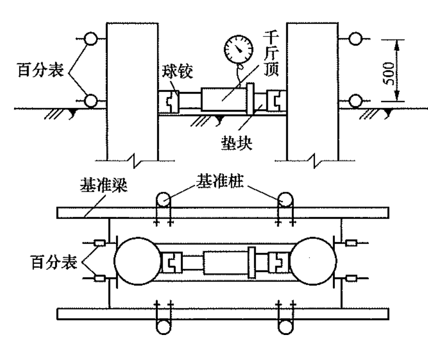


图 9-59 水平静载试验装置示意图

3. 试验设备及仪器的安装要求

（1）水平位移宜采用大量程位移计测量。在受检桩的水平力作用平面对称安装两只位移计；当需要测量桩顶转角时，尚应在水平力作用平面以上 50cm 的受检桩两侧对称安装两只位移计。

（2）位移测量的基准桩应设置在位移反方向的侧面，基准桩与试桩净距不小于 2 倍桩径。

（3）测量桩身应力或应变时，各测试断面的测量传感器应沿受力方向对称布置在受拉和受压主筋上；埋设传感器的纵剖面与受力方向之间的夹角应小于 10°。

4. 试验加荷方式和终止加载的要求

（1）试验加载方法宜根据建筑物性质和设计要求确定。当桩基主要是受单项长期水平荷载时，可采用慢速维持荷载法；对于电力工程中的高压输电工程中的大跨越塔基等，可采用单向单循环加载法或单向多循环加载法，也可按设计要求采用其他加载方法。需要测量桩身应力或应变的试桩宜采用单向单循环加载法或维持荷载法。荷载分级取预估最大试验荷载的 1/10～1/15。

（2）采用单向单循环加载法时，每级荷载施加后维持 20min，在第 5min、第 10min、第 15min、第 20min 测读水平位移，然后卸载至零，维持 10min，每隔 5min 应测读一次。至此完成一个加卸载循环，施加下一级荷载。最后一级卸载测读完成后，再每隔 10min 测读一次，测读 30min。

（3）采用多循环加卸载试验法时，每级荷载施加后，恒载 4min 测读水平位移，然后卸载至零，停 2min 读残余水平位移，至此完成一个加卸载循环，如此循环 5 次便完成一级荷载的试验观测。加载时间应尽量缩短，测量位移的间隔时间应严格准确，试验不得中途停歇。

（4）维持荷载法的试验方法和稳定标准应符合

单桩竖向抗压静载试验的相关规定。

（5）终止试验加载应符合下列要求之一：

1）当桩身折断或水平位移超过 30～40mm（软土或大直径桩取 40mm）时；

2）水平位移达到设计要求的水平位移允许值。

5. 检测数据整理

检测数据应按表 9-82 的格式记录。

表 9-82　单桩水平静载试验原始记录表

主要仪器设备编号：			工程名称：						
桩号：			上下表距：						
荷载（kN）	时间（min）	循环数	加载（）		卸载（）		位移差（mm）	转角（°）	备注
			上表	下表	上表	下表			
		1							
		2							
		3							
		4							
		5							
		1							
		2							
		3							
		4							
		5							
测试时间：				校核：			记录：		

（1）采用单向循环加载法时应绘制水平力-时间-作用点位移（$H-t-Y_0$）关系曲线和水平力-位移梯度（$H-\Delta Y_0/\Delta H$）关系曲线；

（2）采用慢速维持荷载法时应绘制水平力-力作用点位移（$H-Y_0$）关系曲线、水平力-位移梯度（$H-\Delta Y_0/\Delta H$）关系曲线、力作用点位移-时间对数（$Y_0-\lg t$）关系曲线和水平力-力作用点位移双对数（$\lg H-\lg Y_0$）关系曲线；

（3）绘制水平力、水平力作用点水平位移-地基土水平抗力系数的比例系数的关系曲线（H-m、Y_0-m）；

（4）对埋设有应力或应变测量传感器的试验应绘制各级水平力作用下的桩身弯矩分布图和水平力－最大弯矩截面钢筋拉应力（$H-\sigma_s$）曲线。

6. 单桩的水平临界荷载的判定

（1）采取单向多循环加载法时的 $H-t-Y_0$ 曲线或慢速维持荷载法时的 $H-Y_0$ 曲线出现拐点的前一级水平荷载值；

（2）取 $H-\Delta Y_0/\Delta H$ 曲线或 $\lg H-\lg Y_0$ 曲线上第一拐点对应的水平荷载值；

（3）取 $H-\sigma_s$ 曲线第一拐点对应的水平荷载值。

7. 单桩的水平极限承载力的判定

（1）取单向多循环加载法时的 $H-t-Y_0$ 曲线或慢速维持荷载法时的 $H-Y_0$ 曲线产生明显陡降的起始点对应的水平荷载值；

（2）取慢速维持荷载法时的 $Y_0-\lg t$ 曲线尾部出现明显弯曲的前一级水平荷载值；

（3）取 $H-\Delta Y_0/\Delta H$ 曲线或 $\lg H-\lg Y_0$ 曲线上第二拐点对应的水平荷载值；

（4）取桩身折断或受拉钢筋屈服时的前一级水平荷载值。

8. 单桩的水平承载力特征值的确定

（1）当桩身不允许开裂或灌注桩的桩身配筋率小于 0.65%时，取水平临界荷载的 0.75 倍为单桩水平承载力特征值；

（2）对钢筋混凝土预制桩、钢桩和当桩身配筋率不小于 0.65%的灌注桩，取设计桩顶标高处水平位移为 10mm（对水平位移敏感的建筑物取 6mm）所对应荷载的 0.75 倍为单桩水平承载力特征值；

（3）按设计要求的水平允许位移对应的荷载作为单桩水平承载力特征值，但应同时满足桩身抗裂要求。

9. 单桩水平承载力特征值对应的地基土水平抗力系数的比例系数计算

可按下列公式计算：

$$m=\frac{(v_y H)^{\frac{5}{3}}}{b_0 Y_0^{\frac{5}{3}}(EI)^{\frac{2}{3}}} \tag{9-251}$$

$$\alpha=\left(\frac{mb_0}{EI}\right)^{\frac{1}{5}} \tag{9-252}$$

式中　m——地基土水平抗力系数的比例系数，kN/m^4；

α——桩的水平变形系数，1/m；

v_y——桩顶水平位移系数，由式（9-252）试算 α，当 $\alpha h \geqslant 4.0$ 时，h 为桩的入土深度，v_y=2.441；

H——作用于地面的水平力，kN；

Y_0——水平力作用点的水平位移，m；

EI——桩身抗弯刚度，kN·m^2，其中 E 为桩身材料弹性模量，I 为桩身换算截面惯性矩；

b_0——桩身计算宽度，m。对于圆形桩，当桩径 $D\leqslant$1m 时，$b_0=0.9(1.5D+0.5)$；当桩径 $D>$1m 时，b_0=0.9$(D+1)$；对于矩形桩，当边宽 $B\leqslant$1m 时，b_0=1.5B+0.5；当桩径 $D>$1m 时，b_0=B+1。

第六节 典型基础型式及算例

输电线路塔位的地质状况、地形地貌、岩土种类、土层分布、岩土的物理力学指标以及地下水位情况等是基础设计的重要条件。对有地下水的塔位，必须考虑地下水位季节性波动对基础和地基土的影响。

一、钢筋混凝土板柱基础

（一）主要计算内容和计算公式

1. 计算内容

钢筋混凝土板柱基础施工简便，是输电线路工程设计中最常用的基础型式之一，它以夯实的扰动回填土构成抗拔土体以保持基础的上拔稳定，其立柱和底板内均配置受力钢筋，当其底板为台阶式时，要求台阶的宽高比不小于 1.0 且不宜大于 2.5，当其底板为锥台形时，要求基础边缘高度不宜小于 200mm，且两个方向的坡度不宜大于 1:3。根据基柱和底板的形态，板柱基础的常见形式如图 9-60 所示。钢筋混凝土板柱基础属于大开挖类基础，其主要计算内容有上拔稳定、下压地基承载力、倾覆稳定、主柱正截面及斜截面承载力、底板抗弯、底板抗剪、底板冲切计算等。

基础计算时，钢筋混凝土重度取 24kN/m³。位于地下水位以下的基础重度和土体重度应按浮重度计算：混凝土基础的浮重度取 12kN/m³，钢筋混凝土基础的浮重度取 14kN/m³，土的浮重度应根据土的类别和密实度取 8～11kN/m³（一般砂土取小值，黏性土取大值）。计算悬垂型杆塔基础上拔稳定时，粉质黏土和黏土的浮重度可取天然重度。

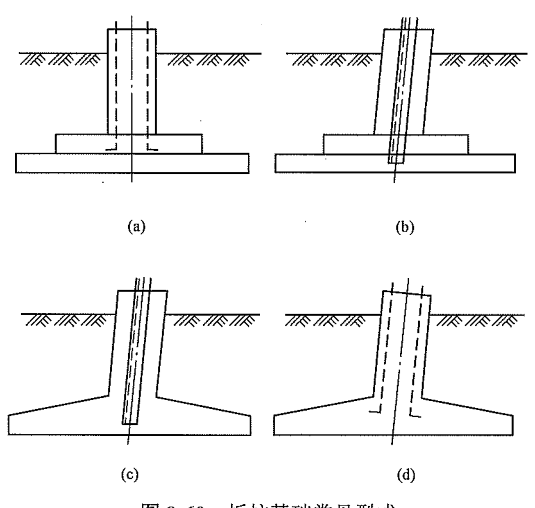


图 9-60 板柱基础常见型式
（a）直柱台阶式；（b）斜柱台阶式；
（c）斜柱平顶锥形；（d）斜柱斜顶锥形

2. 计算公式

板柱基础各项计算内容的计算公式在第九章的第一节至第四节中已经做了详细叙述，本节不再赘述。

（二）计算例题

1. 设计条件

（1）工程地质。一般黏性土，硬塑，天然重度 $\gamma=20.00\text{kN/m}^3$，无地下水及软弱下卧层，天然孔隙比 e 及液性指数 I_L 均小于 0.85，地基承载力特征值 $f_{ak}=210\text{kPa}$。

（2）基础作用力：

下压工况：$N=2494.49\text{kN}$ $N_x=467.58\text{kN}$ $N_y=415.73\text{kN}$

上拔工况：$T_E=2114.92\text{kN}$ $T_x=378.37\text{kN}$ $T_y=390.55\text{kN}$

（3）材料。混凝土强度等级采用 C25，纵向受力钢筋采用 HRB400，其余采用 HPB300，纵向受力钢筋的保护层厚度取 45mm。

（4）基础型式及尺寸。

1）型式：钢筋混凝土板柱基础（见图 9-61）。

2）基本尺寸。

基础埋深 $h=4.3\text{m}$，底板宽度 $B=5.2\text{m}$，主柱宽度 $b=1.6\text{m}$，主柱露头 $h_0=0.2\text{m}$，主柱高度 $h_1=3.8\text{m}$，上台阶宽 $B_u=1.05\text{m}$，上台阶高 $h_u=0.4\text{m}$，下台阶宽 $B_d=0.75\text{m}$，下台阶高 $h_d=0.3\text{m}$。

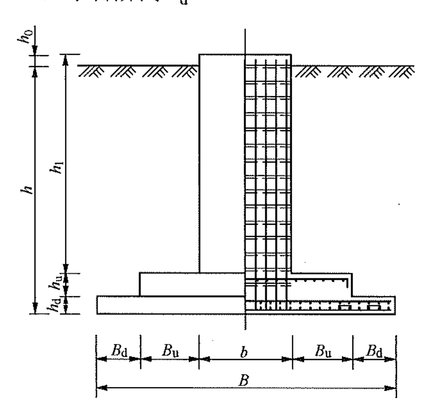


图 9-61 钢筋混凝土板柱基础外形

（5）适用塔型：转角塔，根开 $L=7.58\text{m}$。

2. 上拔稳定计算

$$\gamma_f T_E=1.60\times 2114.92=3383.87\text{kN}$$

$$H_E/T_E=\sqrt{T_X^2+T_Y^2}/T_E$$
$$=\sqrt{378.37^2+390.55^2}/2114.92=0.257$$

$$\gamma_E=1.0-\frac{0.1}{0.25}\times(0.257-0.15)=0.9572$$

$$\gamma_s=17\text{kN/m}^3$$

$$\gamma_{\theta 1}=1.0$$

$$h_t=4.3-0.3=4.0\text{m}$$

$$h_c=2.5B=2.5\times5.2=13.0\text{m}$$

$h_t \leqslant h_c$ 则

$$V_t=h_t\left(B^2+2Bh_t\tan\alpha+\frac{4}{3}h_t^2\tan^2\alpha\right)$$

$$=4.0\times\left(5.2^2+2\times5.2\times4.0\tan25^\circ+\frac{4}{3}\times4.0^2\tan^2 25^\circ\right)$$

$$=204.31\text{m}^3$$

$$L=7.58\text{m}$$

$$B+2h_t\tan\alpha=5.2+2\times4.0\times\tan25^\circ=8.93\text{m}$$

$L < B+2h_t\tan\alpha$ 则

$$\Delta_{Vt}=\frac{(B+2h_t\tan\alpha-L)^2}{24\tan\alpha}(2B+L+4h_t\tan\alpha)$$

$$=\frac{(5.2+2\times4.0\tan25^\circ-7.58)^2}{24\tan25^\circ}(2\times5.2+7.58+4\times4.0\tan25^\circ)$$

$$=4.146\text{m}^3$$

$$V_0=3.7^2\times0.4+1.6^2\times3.6=14.69\text{m}^3$$

$$Q_f=V_f\cdot\gamma_c=(14.69+5.2^2\times0.3+1.6^2\times0.2)\times24$$

$$=559.54\text{kN}$$

$\gamma_E\gamma_s\gamma_{\theta1}(V_t-\Delta_{Vt}-V_0)+Q_f=0.9572\times17\times1.0\times(204.31-4.146-14.69)+559.54=3577.64\text{kN}$

故 $\gamma_f T_E \leqslant \gamma_E\gamma_s\gamma_{\theta1}(V_t-\Delta_{Vt}-V_0)+Q_f$（3383.87kN<3577.64kN）

3. 下压地基承载力计算

（1）基础底面处压力设计值的计算。

$$Q_f=(5.2^2\times0.3+3.7^2\times0.4+1.6^2\times3.8)\times24$$

$$=23.316\times24=559.584\text{kN}$$

$$G_0=(5.2^2\times4.3-5.2^2\times0.3-3.7^2\times0.4-1.6^2\times3.6)\times20$$

$$=93.468\times20=1869.36\text{kN}$$

$$G=Q_f+G_0=559.584+1869.36=2428.944\text{kN}$$

$$P=\frac{F+\gamma_G G}{A}=\frac{2494.49+1.2\times2428.944}{5.2^2}=200.045\text{kPa}$$

$$\frac{M_x}{W_y}=\frac{467.58\times4.5}{\frac{1}{6}\times5.2^3}=89.786\text{kPa}$$

$$\frac{M_y}{W_x}=\frac{415.73\times4.5}{\frac{1}{6}\times5.2^3}=79.830\text{kPa}$$

$$P_{min}=\frac{F+\gamma_G G}{A}-\frac{M_x}{W_y}-\frac{M_y}{W_x}=200.045-89.786-79.830$$

$$=30.43\text{kPa}>0$$

则

$$P_{max}=\frac{F+\gamma_G G}{A}+\frac{M_x}{W_y}+\frac{M_y}{W_x}=200.045+89.786+79.830$$

$$=369.66\text{kPa}$$

（2）修正后的地基承载力特征值计算。

$$f_{ak}=210\text{kPa}$$

$$f_a=f_{ak}+\eta_b\gamma(b-3)+\eta_d\gamma_m(h-0.5)$$

$$=210+0.3\times20\times(5.2-3)+1.6\times20\times(4.3-0.5)$$

$$=210+13.2+121.6=344.8\text{kPa}$$

$$f_a/\gamma_{rf}=344.8/0.75=459.73\text{kPa}$$

$$1.2f_a/\gamma_{rf}=1.2\times344.8/0.75=551.68\text{kPa}$$

根据（1）、（2），易知：

$P<f_a/\gamma_{rf}$（200.045kPa<459.73kPa）

$P_{max}<1.2\cdot f_a/\gamma_{rf}$（369.66kPa<551.68kPa）

4. 倾覆稳定计算

（1）上拔时倾覆稳定的计算。

此处考虑倾覆计算时，取 $\gamma_f=1.3$，则

$$\sum G=Q_f+G_0=559.584+17\times(204.31-4.146-14.69)$$

$$=3712.64\text{kN}$$

$$\gamma_f M_s=\gamma_f\left[T\frac{\sqrt{a^2+b^2}}{2}+H(h_1+h_2+h_3)\right]$$

$$=1.3\times\left[2114.92\times\frac{\sqrt{5.2^2+5.2^2}}{2}+\sqrt{(378.37^2+390.55^2)}\times(0.2+3.6+0.4)\right]$$

$$=13\,078.43\text{kN}\cdot\text{m}$$

$$M_r=\gamma_E\sum G\frac{\sqrt{a^2+b^2}}{2}$$

$$=1.2\times3712.64\times\frac{\sqrt{5.2^2+5.2^2}}{2}$$

$$=16\,378.99\text{kN}\cdot\text{m}$$

故倾覆力矩 $\gamma_f M_s$ 小于抗倾覆力矩 M_r，即 $\gamma_f M_s<M_r$（13078.43kN·m<16378.99kN·m）

（2）下压时倾覆稳定的计算。

$$\sum G=Q_f+G_0=559.584+20\times93.468=2428.94\text{kN}$$

$$\gamma_f M_s=\gamma_f\left[H(h_1+h_2+h_3+h_4)-N\frac{\sqrt{a^2+b^2}}{2}\right]$$

$$=1.6\times\left[543.78\times(0.2+3.6+0.4+0.3)-2494.49\times\frac{\sqrt{5.2^2+5.2^2}}{2}\right]$$

$$=-10760.21\text{kN}\cdot\text{m}$$

$$M_r=\gamma_g\sum G\frac{\sqrt{a^2+b^2}}{2}$$
$$=1.2\times2428.94\times\frac{\sqrt{5.2^2+5.2^2}}{2}$$
$$=10\,715.71\text{kN}\cdot\text{m}$$

故倾覆力矩 $\gamma_f M_s$ 小于抗倾覆力矩 M_r，即

$\gamma_f M_s<M_r$（–10760.21kN • m<10715.71kN • m）

根据（1）、(2)，易知倾覆稳定计算满足要求。

5. 基柱正截面承载力计算

（1）双向对称配筋时，钢筋混凝土矩形截面双向偏心受拉构件正截面承载力计算，应满足式（9-150）的要求。计算时可按如下步骤进行：

1）根据式（9-150）的第一式和全部纵向受力钢筋的最小配筋率，计算 A_s；

2）选择钢筋直径，计算 n、n_x、n_y，钢筋直径一般选择 14～36mm，钢筋总根数取 4 的倍数；

3）计算钢筋净间距 s；

4）判断钢筋净间距 s 是否≥60mm，如满足，执行第 5）步，如不满足，加大钢筋直径，重复以上 2）～4）步；

5）按式（9-150）中的第二式和第三式验算，如满足要求，执行第 6）步，如不满足，重新选择钢筋直径或增加钢筋根数后，重复以上 2）～5）步；

6)验算偏心受拉构件一侧最小配筋率是否满足要求，如满足，结束，如不满足，重新选择钢筋直径或增加钢筋根数后，重复以上 2）～6）步。

通过以上步骤即可计算得到合适的配筋方案。实际计算时，为计算方便考虑，往往是初选钢筋间距，计算 n、n_x、n_y 及各参数，而后求得 A_{smin}、A_s、A_{sy}、A_{sx}，然后选配钢筋。

（2）基柱纵向受力钢筋计算如下：

基柱的台阶根部截面为配筋计算的控制截面，易知：

$$e_{0x}=\frac{T_x h_1}{T_E}=\frac{378.37\times3.8}{2114.92}=0.680\text{m}$$

$$e_{0y}=\frac{T_y h_1}{T_E}=\frac{390.55\times3.8}{2114.92}=0.702\text{m}$$

$$Z_x=Z_y=1600-2\times(45+10)=1490\text{mm}=1.490\text{m}$$

$$\gamma_{ag}=1.1$$

根据式（9-150）的第一式，则

$$A_s\geqslant2T_E\times\left(\frac{1}{2}+\frac{e_{0x}}{Z_x}+\frac{e_{0y}}{Z_y}\right)\times\frac{\gamma_{ag}}{f_y}=2\times2114.92\times10^3\times$$
$$\left(\frac{1}{2}+\frac{0.680}{1.490}+\frac{0.702}{1.490}\right)\times\frac{1.1}{360}=18450\text{mm}^2$$

纵向钢筋采用 HRB400，全部纵向受力钢筋的最小配筋率为 0.55%

$$A_{s\min}=0.55\%\times1600^2=14080\text{mm}^2$$

初选纵向钢筋直径为 20mm，$A_{sc}=314.2\text{mm}^2$，则

$$n\geqslant\frac{A_s}{A_{sc}}=\frac{18\,450}{314.2}=58.72\text{，取 }n=60$$

计算钢筋净间距，

$$s=\frac{1600-2\times(45+10)}{\frac{60}{4}}-20=79\text{mm}>60\text{mm}$$

虽然净间距满足要求，但较小，可适当加大钢筋直径，如取钢筋直径为 25mm，则

$$n\geqslant\frac{A_s}{A_{sc}}=\frac{18\,450}{490.9}=37.58\text{，取 }n=44$$

$$s=\frac{1600-2\times(45+12.5)}{\frac{44}{4}}-25=110\text{mm}>60\text{mm}\text{，}$$

净间距满足要求。

验算式（9-150）的第二式，则

$$A_{sy}=22\times490.9=10\,799.8\text{ mm}^2$$

$$2T_E\left(\frac{n_y}{n}+\frac{2e_{0y}}{n_xZ_y}+\frac{e_{0x}}{Z_x}\right)\frac{\gamma_{ag}}{f_y}=2\times2114.92\times10^3\times$$
$$\left(\frac{12}{44}+\frac{2\times0.702}{12\times1.49}+\frac{0.680}{1.49}\right)\times\frac{1.1}{360}=10439\text{mm}^2$$

故 $A_{sy}>2T_E\left(\frac{n_y}{n}+\frac{2e_{0y}}{n_xZ_y}+\frac{e_{0x}}{Z_x}\right)\frac{\gamma_{ag}}{f_y}$（10799.8mm²>10439mm²）

验算式（9-150）的第三式，则

$$A_{sx}=22\times490.9=10\,799.8\text{mm}^2$$

$$2T_E\left(\frac{n_x}{n}+\frac{2e_{0x}}{n_yZ_x}+\frac{e_{0y}}{Z_y}\right)\frac{\gamma_{ag}}{f_y}=2\times2114.92\times10^3\times$$
$$\left(\frac{12}{44}+\frac{2\times0.680}{12\times1.49}+\frac{0.702}{1.49}\right)\times\frac{1.1}{360}=10598\text{mm}^2$$

故 $A_{sy}>2T_E\left(\frac{n_x}{n}+\frac{2e_{0x}}{n_yZ_x}+\frac{e_{0y}}{Z_y}\right)\frac{\gamma_{ag}}{f_y}$（10799.8mm²>10598mm²）

根据表 9-151，偏心受拉构件一侧受拉钢筋的最小配筋率为

$$\max(0.2,45f_t/f_y)\%=\max(0.2,45\times1.27/360)\%$$
$$=0.2\%$$

按上述计算成果进行钢筋配置时，实际单侧受拉钢筋配筋率

$$\frac{12\times490.9}{1600\times1600}=0.23\%>0.2\%$$

即偏心受拉基柱构件满足单侧最小配筋率的要求。

综上，实配纵筋 HRB400，钢筋直径 d=25mm，n=44 根，$n_x=n_y$=12 根。

6. 基柱斜截面承载力计算

根据式（9-197）和式（9-198），则

$$\lambda=\frac{3.8}{1.6-0.058}=2.46$$

$$\begin{aligned}V_c&=\frac{1.75}{\lambda+1}f_t bh_0-0.2N_m\\&=\frac{1.75}{2.46+1}\times1270\times1.6\times1.542-0.2\times2114.92\\&=1161.80\text{kN}>390.55\text{kN}\end{aligned}$$

基础主柱混凝土本身的抗剪承载力大于剪力设计值，斜截面只需按构造设置一些箍筋即可。基柱箍筋根据构造要求选用 $\phi8$，箍筋间距 s 取 200mm，采用复合箍筋。

7. 基础底板抗弯计算

钢筋混凝土板柱基础的底板长宽尺寸较接近，在地基土的反力作用下属双向弯曲构件，其内力计算通常采用简化计算方法。即将底板假定为固定于基柱周边上的四面伸出的悬臂板，近似地将地基土反力按底板对角线划分；沿基础底板长、宽两个方向的弯矩，假定等于基底梯形面积上地基土反力所产生的力矩；沿底板长、宽两个方向的剪力，假定等于基底梯形面积上地基土反力之和。对钢筋混凝土底板，其正截面抗拉强度由受拉钢筋承担，而抗剪及抗冲切力由混凝土承担。

架空输电线路钢筋混凝土板柱基础的底板通常采用双向对称配筋，包括底板上台阶上部双向配筋、下台阶上部双向配筋、下台阶下部双向配筋。配筋计算时，下台阶上部双向配筋根据 1-1 截面上拔工况的计算截面弯矩计算，下台阶下部双向配筋根据图 9-62 中 1-1 截面下压工况的计算截面弯矩计算、上台阶上部双向配筋根据 2-2 截面下压工况的计算截面弯矩进行计算。

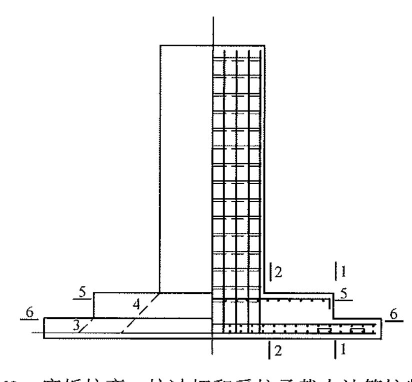


图 9-62　底板抗弯、抗冲切和受拉承载力计算控制截面

注：1-1 和 2-2 截面为底板抗弯、抗剪计算控制截面；3-3 和 4-4 斜截面为冲切破坏斜截面；5-5 和 6-6 截面为混凝土受拉计算的控制截面。

（1）控制截面的弯矩计算。

1）1-1 截面上拔工况时：

$$\begin{aligned}P_{max}&=\frac{T}{bl-b_1l_1}+\frac{6M_xl}{bl^3-b_1l_1^3}\\&=\frac{2114.92}{5.2\times5.2-1.6\times1.6}+\frac{6\times390.55\times3.8\times5.2}{5.2\times5.2^3-1.6\times1.6^3}\\&=86.39+63.90=150.29\text{kN/m}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P_{min}&=\frac{T}{bl-b_1l_1}-\frac{6M_xl}{bl^3-b_1l_1^3}\\&=\frac{2114.92}{5.2\times5.2-1.6\times1.6}-\frac{6\times390.55\times3.8\times5.2}{5.2\times5.2^3-1.6\times1.6^3}\\&=86.39-63.90=22.49\text{kN/m}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}p_c&=\frac{P_{max}-P_{min}}{b}\left[b-\frac{(b-b_1)}{2}\right]+P_{min}\\&=\frac{150.30-22.49}{5.2}\times\left[5.2-\frac{(5.2-1.6)}{2}\right]+22.49\\&=106.06\text{kN/m}^2\end{aligned}$$

$$P_1=\frac{P_{max}+p_c}{2}=\frac{150.30+106.06}{2}=128.18\text{kN/m}^2$$

$$\begin{aligned}M_{1-1}&=\frac{P_1}{24}\times(b-b_1)^2\times(2l+l_1)\\&=\frac{128.18}{24}\times(5.2-1.6)^2\times(2\times5.2+1.6)\\&=830.61\text{kN}\cdot\text{m}\end{aligned}$$

2）2-2 截面上拔工况时：

$$\begin{aligned}P_{max}&=\frac{T}{bl-b_1l_1}+\frac{6M_xl}{bl^3-b_2l_2^3}\\&=\frac{2114.92}{5.2\times5.2-1.6\times1.6}+\frac{6\times390.55\times4.2\times5.2}{5.2\times5.2^3-3.7\times3.7^3}\\&=86.39+94.12=180.51\text{kN/m}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P_{min}&=\frac{T}{bl-b_1l_1}-\frac{6M_xl}{bl^3-b_2l_2^3}\\&=86.39-94.12=-7.73\text{kN/m}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}p_c&=\frac{P_{max}-P_{min}}{b}\times\left[b-\frac{(b-b_2)}{2}\right]+P_{min}\\&=\frac{180.51-(-7.73)}{5.2}\times\left[5.2-\frac{(5.2-3.7)}{2}\right]-7.73\\&=153.36\text{kN/m}^2\end{aligned}$$

$$P_2=\frac{P_{max}+p_c}{2}=\frac{180.51+153.36}{2}=166.94\text{kN/m}^2$$

$$\begin{aligned}M_{2-2}&=\frac{P_2}{24}\times(b-b_2)^2\times(2l+l_2)\\&=\frac{166.94}{24}\times(5.2-3.7)^2\times(2\times5.2+3.7)\\&=220.67\text{kN}\cdot\text{m}\end{aligned}$$

3）1-1 截面下压工况时：

$$P'_{max}=\frac{F}{bl}+\frac{M_y}{W_x}$$
$$=\frac{2494.49}{5.2\times5.2}+\frac{6\times467.58\times4.5}{5.2^3}$$
$$=92.25+89.79=182.04\text{kN/m}^2$$

$$P'_{min}=\frac{F}{bl}-\frac{M_y}{W_x}=92.25-89.79=2.46\text{kN/m}^2$$

$$p_c=\frac{P'_{max}-P'_{min}}{b}\times\left[b-\frac{(b-b_1)}{2}\right]+P'_{min}$$
$$=\frac{182.04-2.46}{5.2}\times\left[5.2-\frac{(5.2-1.6)}{2}\right]+2.46$$
$$=119.88\text{kN/m}^2$$

$$P_1=\frac{P'_{max}+p_c}{2}=\frac{182.04+119.88}{2}=150.96\text{kN/m}^2$$

$$M_{1-1}=\frac{P_1}{24}\times(b-b_1)^2\times(2l+l_1)$$
$$=\frac{150.96}{24}\times(5.2-1.6)^2\times(2\times5.2+1.6)$$
$$=978.22\text{kN}\cdot\text{m}$$

4）2-2 截面下压工况时：

$$p_c=\frac{P'_{max}-P'_{min}}{b}\times\left[b-\frac{(b-b_1)}{2}\right]+P'_{min}$$
$$=\frac{182.04-2.46}{5.2}\times\left[5.2-\frac{(5.2-3.7)}{2}\right]+2.46$$
$$=156.14\text{kN/m}^2$$

$$P_2=\frac{P'_{max}+p_c}{2}=\frac{182.04+156.14}{2}=169.09\text{kN/m}^2$$

$$M_{2-2}=\frac{P_2}{24}\times(b-b_1)^2\times(2l+l_1)$$
$$=\frac{169.09}{24}\times(5.2-3.7)^2\times(2\times5.2+3.7)$$
$$=223.52\text{kN}\cdot\text{m}$$

（2）控制截面的抗弯配筋计算。

1）上台阶上部钢筋：

$$M_{1-1}=830.61\text{kN}\cdot\text{m}$$
$$h_0=0.7-0.045=0.655\text{m}$$
$$x=h_0-\sqrt{h_0^2-\frac{2M_{1-1}}{\alpha_1 f_c b}}$$
$$=0.655-\sqrt{0.655^2-\frac{2\times830.61}{1.0\times11.9\times10^3\times3.7}}$$
$$=0.0295\text{m}<\xi_b h_0=0.576\times0.655=0.377\text{m}$$
$$A_s=\frac{M_{1-1}}{\left(h_0-\frac{x}{2}\right)f_y}=\frac{830.61\times10^6}{\left(0.655-\frac{0.0295}{2}\right)\times300\times10^3}$$
$$=4324\text{mm}^2$$

最小配筋率 $\rho_{smin}=0.15\%$

$$A_{smin}=0.15\%\times3700\times700=3885\text{mm}^2$$

A_s 满足最小配筋率要求。

2）下台阶上部钢筋：

$$M_{2-2}=220.67\text{kN}\cdot\text{m}$$
$$h_0=0.3-0.045=0.255\text{m}$$
$$x=h_0-\sqrt{h_0^2-\frac{2M_{2-2}}{\alpha_1 f_c b}}$$
$$=0.255-\sqrt{0.255^2-\frac{2\times220.67}{1.0\times11.9\times10^3\times5.2}}$$
$$=0.0144\text{m}<\xi_b h_0=0.576\times0.255=0.147\text{m}$$
$$A_s=\frac{M_{2-2}}{\left(h_0-\frac{x}{2}\right)f_y}=\frac{220.67\times10^6}{\left(0.255-\frac{0.0144}{2}\right)\times270\times10^3}$$
$$=3298\text{mm}^2$$

最小配筋率 $\rho_{smin}=0.15\%$

$$A_{smin}=0.15\%\times5200\times300=2340\text{mm}^2$$

A_s 满足最小配筋率要求。

3）下台阶下部钢筋：

按下压工况 1-1 截面计算时

$$M=978.22\text{kN/m}^2$$
$$h_0=0.7-0.045=0.655\text{m}$$
$$x=h_0-\sqrt{h_0^2-\frac{2M}{\alpha_1 f_c b}}$$
$$=0.655-\sqrt{0.655^2-\frac{2\times978.22}{1.0\times11.9\times10^3\times5.2}}$$
$$=0.0196<\xi_b h_0=0.576\times0.655=0.377\text{m}$$
$$A_s=\frac{M}{\left(h_0-\frac{x}{2}\right)f_y}=\frac{978.22\times10^6}{\left(0.655-\frac{0.0196}{2}\right)\times270\times10^3}$$
$$=5615\text{mm}^2$$

最小配筋率 $\rho_{smin}=0.15\%$

$$A_{smin}=0.15\%\times3700\times700=3885\text{mm}^2$$

A_s 满足最小配筋率要求。

按下压工况 2-2 截面计算时

$$M=223.52\text{kN/m}^2$$
$$h_0=0.3-0.045=0.255\text{m}$$
$$x=h_0-\sqrt{h_0^2-\frac{2M}{\alpha_1 f_c b}}$$
$$=0.255-\sqrt{0.255^2-\frac{2\times223.52}{1.0\times11.9\times10^3\times5.2}}$$
$$=0.0146<\xi_b h_0=0.576\times0.255=0.147\text{m}$$

$$A_s=\frac{M}{\left(h_0-\frac{x}{2}\right)f_y}=\frac{223.52\times10^6}{\left(0.255-\frac{0.0146}{2}\right)\times270\times10^3}$$
$$=3444\text{mm}^2$$

最小配筋率 $\rho_{smin}=0.15\%$

$$A_{smin}=0.15\%\times5200\times300=2340\text{mm}^2$$

综合下压工况 1-1 截面和 2-2 截面的计算结果，下台阶下部钢筋 A_s 取 5615mm²。

8. 基础底板抗冲切计算

冲切破坏斜截面如图 9-62 中所示即 3-3 斜截面和 4-4 斜截面。

（1）考虑下压时，地基土单位面积净反力的计算

$$p_j=\frac{F}{bl}+\frac{M_y}{W_x}=\frac{2494.49}{5.2\times5.2}+\frac{6\times467.58\times4.5}{5.2^3}$$
$$=92.25+89.79=182.04\text{kN/m}^2$$

（2）冲切破坏锥体斜截面尺寸计算、冲切力面积计算

$a_{t3}=3.7\text{m}$，由于 $a_{t3}+2h_{03}=3.7+2\times(0.3-0.051)=4.198<l=5.2$，所以

$$a_{b3}=a_{t3}+2h_{03}=4.198\text{m}$$
$$a_{m1}=\frac{a_{t1}+a_{b1}}{2}=\frac{3.7+4.198}{2}=3.949\text{m}$$

同理：$a_{t4}=1.6\text{m}$，由于 $a_{t4}+2h_{04}=1.6+2\times(0.7-0.051)=2.898<l=5.2$，所以

$$a_{b4}=a_{t4}+2h_{04}=2.898\text{m}$$
$$a_{m4}=\frac{a_{t4}+a_{b4}}{2}=\frac{1.6+2.898}{2}=2.249\text{m}$$
$$A_{l3}=\frac{(l-a_{b3})}{2}l-\left[\frac{(l-a_{b3})}{2}\right]^2$$
$$=\frac{(5.2-4.198)}{2}\times5.2-\left[\frac{(5.2-4.198)}{2}\right]^2$$
$$=2.605-0.251=2.354\text{m}^2$$
$$A_{l4}=\frac{(l-a_{b4})}{2}l-\left[\frac{(l-a_{b4})}{2}\right]^2$$
$$=\frac{(5.2-2.898)}{2}\times5.2-\left[\frac{(5.2-2.898)}{2}\right]^2$$
$$=5.985-1.325=4.66\text{m}^2$$

（3）基础底板 3-3 斜截面和 4-4 斜截面抗冲切验算。

考虑 3-3 抗冲切：

$$F_3=A_{l3}\times p_j=2.354\times182.04$$
$$=428.52\leqslant0.7\beta_{hp}f_ta_mh_0$$
$$=0.7\times1.0\times1.27\times10^{-3}\times3949\times249$$
$$=874.15\text{kN}$$

考虑 4-4 截面抗冲切：

$$F_4=A_{l4}\times p_j=4.66\times182.04$$
$$=848.31\leqslant0.7\beta_{hp}f_ta_mh_0$$
$$=0.7\times1.0\times1.27\times10^{-3}\times2249\times649=1297.59\text{kN}$$

冲切验算满足要求。

9. 基础底板抗剪计算

分别验算柱边截面（2-2 截面）、变阶处截面（1-1 截面）的底板抗剪承载力。

（1）上拔荷载作用下基底净反力的计算。上拔荷载作用下，基底净反力的计算在基础底板抗弯计算时已计算过，不再赘述。

（2）剪力面积计算。

$$A_{cx1}=\frac{5.2+3.7}{2}\times\left(\frac{5.2-3.7}{2}\right)=3.34\text{m}^2$$
$$A_{cx2}=\frac{5.2+1.6}{2}\times\left(\frac{5.2-1.6}{2}\right)=6.12\text{m}^2$$

（3）计算截面的计算宽度和高度。变阶处截面中和轴计算宽度和高度：$b_{01}=5.2\text{m}$，$h_{01}=0.3-0.045-0.018=0.237\text{m}$。

柱边截面中和轴处计算高度和宽度：$b_{02}=3.7\text{m}$，$h_{02}=0.637\text{m}$，此处计算宽度没有按照 GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》附录 U 计算，而按照 DL/T 5219—2014《架空输电线路基础设计技术规程》相关规定直接取用。

（4）1-1 截面、2-2 截面上拔荷载作用下抗剪承载力验算。

考虑 1-1 截面抗剪：

$$V=\frac{P_{max}+P_{x1}}{2}A_{cx1}=\frac{P_{max}+P_{x1}}{2}A_{cx1}$$
$$=166.94\times3.34=557.58\text{kN}\leqslant0.6b_0h_0f_t$$
$$=0.6\times5.2\times0.237\times1270=939.09\text{kN}$$

考虑 2-2 截面抗剪：

$$V=\frac{P_{max}+P_{x2}}{2}A_{cx2}=\frac{P_{max}+P_{x2}}{2}A_{cx2}$$
$$=128.18\times6.12=784.46\text{kN}\leqslant0.6b_0h_0f_t$$
$$=0.6\times3.7\times0.637\times1270=1795.96\text{kN}$$

10. 混凝土正截面受拉承载力计算

混凝土受拉构件 5-5 正截面和 6-6 正截面如图 9-62 所示，承载力计算如下：

$$M_{s1}=H_Y\times3.8=390.55\times3.8=1484.09\text{kN}\cdot\text{m}$$
$$M_{s2}=H_Y\times4.2=390.55\times4.2=1640.31\text{kN}\cdot\text{m}$$
$$h_1=3700\text{mm}>1600\text{mm},\text{取}1600\text{mm}$$
$$h_2=5200\text{mm}>1600\text{mm},\text{取}1600\text{mm}$$
$$\gamma_{11}=1.55\times\left(0.7+\frac{120}{h_1}\right)=1.55\times\left(0.7+\frac{120}{1600}\right)=1.201$$

$$\gamma_{12}=1.55\times\left(0.7+\frac{120}{h_2}\right)=1.55\times\left(0.7+\frac{120}{1600}\right)=1.201$$

$$A_{h1}=3.7^2=13.69\text{m}^2$$

$$A_{h2}=5.2^2=27.04\text{m}^2$$

$$W_{01}=\frac{1}{6}bh^2=\frac{1}{6}\times3.7\times3.7^2=8.442$$

$$W_{02}=\frac{1}{6}bh^2=\frac{1}{6}\times5.2\times5.2^2=23.435$$

则对于 5-5 截面和 6-6 截面分别有（T_E 计算时扣掉了截面以上的基础自重）：

$$\frac{T_E}{A_{h1}}+\frac{M_{s1}}{\gamma_{11}W_{01}}=\frac{2114.92-233.47}{13.69}+\frac{1484.09}{1.201\times8.442}$$
$$=137.43+146.38=283.81\text{kPa}<0.59f_t$$
$$=0.59\times1270=749.30\text{kPa}$$

$$\frac{T_E}{A_{h1}}+\frac{M_{s1}}{\gamma_{11}W_{01}}=\frac{2114.92-364.896}{27.04}+\frac{1640.31}{1.201\times23.435}$$
$$=64.72+58.28=123.00\text{kPa}<0.59f_t$$
$$=0.59\times1270=749.30\text{kPa}$$

素混凝土正截面受拉承载力满足要求。

二、掏挖基础

(一) 主要计算内容和计算公式

1. 计算内容和尺寸构造要求

掏挖基础系指将混凝土和钢筋骨架浇筑于以机械或人工掏挖成型的土胎内的一种基础型式，它是以天然土为抗拔土体保持基础的上拔稳定，属于原状土类基础。掏挖基础宜用于在施工掏挖和浇注混凝土时无水渗入基坑的可塑、硬塑黏性土地质条件下。它能充分发挥原状土的特性，不仅具有良好的抗拔性能，而且具有较大的横向承载力，节省材料、取消了模板和回填土、加快施工进度、降低工程造价等优点。

掏挖基础的主要计算内容有上拔稳定、下压地基承载力、主柱正截面及斜截面承载力、底板强度计算等。

掏挖基础仅立柱内配置受力钢筋。为便于人工掏挖，基柱直径不应小于 0.8m；为确保施工中人身安全，扩底部直径不宜大于基柱直径的 3 倍，基础埋深不宜大于基柱直径的 4 倍。扩底部的圆柱高度可取 100mm。扩底端侧面的斜率对于粉土和黏性土不宜大于 1。

2. 计算公式

掏挖基础各项计算内容的计算方法在第九章的第一节至第五节中大部分已经做了详细叙述，本节仅针对掏挖基础的圆形底板基础底面压力计算略做补充说明。

（1）不考虑侧向土抗力时圆形底板基础底面压力计算。

1）当轴心荷载作用时，根据式（9-26）计算；

2）当单向偏心荷载作用时，根据式（9-27）计算，当依据式（9-27）所得 $P_{min}<0$ 时，P_{max} 应根据外荷载与基底反力相平衡的原则按式（9-28）重新计算。

（2）考虑侧向土抗力时圆形底板基础底面压力计算。

1）当偏心荷载作用时：

$$P_{max}=\frac{F+\gamma_G G}{A}+\frac{M_h}{W} \qquad (9\text{-}253)$$

$$P_{min}=\frac{F+\gamma_G G}{A}-\frac{M_h}{W} \qquad (9\text{-}254)$$

式中 M_h ——作用于基础底面的弯矩设计值，kN·m，可根据式（9-31）～式（9-38）计算求得。掏挖基础基柱一般满足刚性条件，如不满足则应按扩底灌注弹性桩的相关规定进行计算分析。

2）原状土基础刚性基柱考虑土抗力时侧向弯矩的计算步骤。原状土基础刚性基柱考虑土抗力时侧向弯矩的计算已经在第九章第二节给出，此处仅针对掏挖基础底面弯矩 M_h 的计算给出简要的计算步骤：

1）根据式（9-31）～式（9-32）判定基础是否刚性，如果不满足刚性条件，则应按弹性桩进行设计计算。

2）根据式（9-36）计算基础的旋转角。

3）根据式（9-37）计算基础主柱转动中心到地面距离 x_A。

4）根据式（9-34）计算基柱任一截面弯矩 M_x。

5）根据式（9-35）计算作用于基础底面的弯矩 M_h。

(二) 计算例题

1. 设计条件

（1）工程地质。

0～-0.3m 为耕植土层，-0.3～-10m 为一般黏性土，塑性指数 $I_p=13$，天然孔隙比 $e=0.8$，液性指数 $I_L=0.5$，天然容重 $\gamma=18.0\text{kN/m}^3$，无地下水，标准冻结深度-2.0m。

（2）基础作用力。

下压工况：$N=300\text{kN}$　$N_x=34\text{kN}$　$N_y=25\text{kN}$

上拔工况：$T_E=240\text{kN}$　$T_x=25\text{kN}$　$T_y=18\text{kN}$

（3）材料。

混凝土强度等级采用 C25，纵向受力钢筋采用 HRB400，其余采用 HPB300。

（4）基础型式及尺寸。

1）型式：掏挖基础（图 9-63）。

2）基本尺寸。

基础埋深 $h=2.7\text{m}$，扩底直径 $D=2.0\text{m}$，主柱直径 $d=1.0\text{m}$，露头高度 $h_1=0.2\text{m}$。

其余尺寸：$h_2=2.1\text{m}$，$h_3=0.5\text{m}$，$h_4=0.1\text{m}$。

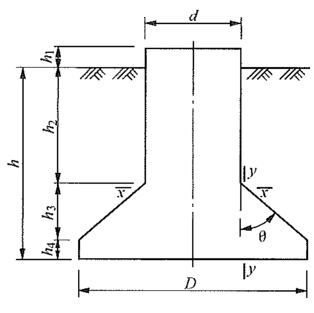


图 9-63　掏挖基础外形

（5）适用塔型：直线塔，根开 8.0m。

2. 上拔稳定计算

（1）有关参数。

1）计算埋深：h_t=2.7−0.1−0.3=2.3m（耕植土厚度 0.3m 上拔稳定计算时，按悬臂考虑），临界深度 $h_c=2.5D=2.5\times2.0=5.0\text{m}>2.3\text{m}$。

2）基础体积 V_f、h_t 深度范围内的基础体积 V_0 和自重力 G_f，基础底面正上方土的体积 V_1，基础底面正上方土的重力 G_0：

$$V_f=\pi\times1.0^2\times0.1+\pi\times0.5^2\times2.3+\frac{\pi}{3}\times 0.5\times\left(1.0^2+0.5^2+0.5\times1.0\right)=3.04\text{m}^3$$

$$V_0=\pi\times0.5^2\times1.8+\frac{\pi}{3}\times0.5\times\left(1.0^2+0.5^2+0.5\times1.0\right)=2.33\text{m}^3$$

$$G_f=3.04\times24=72.96\text{kN}$$

$$V_1=\frac{1}{4}\pi D^2h-V_f+\pi\times1.0^2\times0.1=8.482-3.04+0.314=5.756\text{m}^3$$

$$G_0=5.756\times18=103.608\text{kN}$$

3）水平力影响系数：$H_E/T_E=\sqrt{T_x^2+T_y^2}/T_E=\sqrt{25^2+18^2}/240=0.128<0.15$ 则 $\gamma_E=1.0$

4）基底展开角影响系数：基底展开角 $\theta=45°$，则基底展开角影响系数 $\gamma_\theta=1.0$。

5）由 $I_P=13$、$e=0.8$，查表得 $c=43\text{kN/m}^2$，$\varphi=16°$，硬塑，$\gamma_s=17\text{kN/m}^3$。

6）无因次计算系数：由基础深径比 $h_t/D=2.3/2.0=1.15$，内摩擦角，$\varphi=16°$，黏土宜取 $n=4$，查表或依据相关计算公式可得

$A_1=3.804$，$A_2=0.446$，$A_3=1.190$。

（2）抗拔承载力设计值 R_T：

$$R_T=\frac{A_1ch_t^2+A_2\gamma_sh_t^3+\gamma_s(A_3h_t^3-V_0)}{2.0}+G_f$$

$$=\frac{3.804\times43\times2.3^2+0.446\times17\times2.3^3+17\times(1.190\times2.3^3-2.33)}{2.0}+72.96$$

$$=654.99\text{kN}$$

$$\gamma_fT_E=1.10\times240=264\text{kN}$$

$$\gamma_E\gamma_\theta R_T=1.0\times1.0\times654.99=654.99\text{kN}$$

$$\gamma_fT_E\leqslant\gamma_E\gamma_\theta R_T\ （264.00\text{kN}<654.99\text{kN}）$$

满足上拔稳定要求。

3. 下压地基承载力计算

（1）考虑侧向土抗力时基础底面压力设计值计算。

1）基柱刚性条件判定。一般黏性土，液性指数 $I_L=0.5$，取地基水平抗力系数比例系数为 4000kN/m⁴，杆塔为悬垂型杆塔，取基柱抗弯刚度 $EI=0.8E_cI=0.8\times2.8\times10^4\times10^3\times（1/64\times\pi\times1.0^4）=1099557\text{kPa}\cdot\text{m}^4$

$$则\ \alpha=\left(\frac{md}{EI}\right)^{\frac{1}{5}}=\left(\frac{4000\times1.0}{1\,099\,557}\right)^{\frac{1}{5}}=0.3252\text{m}^{-1}$$

则刚性长度 $2.5/\alpha=2.5/0.3252=7.69\text{m}\geqslant2.1\text{m}$，故按刚性桩计算。

2）基础旋转角计算。

下压工况时作用于基础上的水平力合力设计值，$H=\sqrt{34^2+25^2}=42.2\text{kN}$

因为 $d\leqslant1.0$m，基柱的计算直径，$d'=0.9\times(1.5d+0.5)=1.8$m

基础露头 $h_0=0.2$m

基底截面抵抗矩 $W=1/32\pi D^3=1/32\pi2.0^3=0.7854\text{m}^3$

基底地基土的竖向抗力系数 $C_0=m_0h=mh=4000\times2.7=10800\text{kN/m}^3$

则基础的旋转角：

$$\omega=\frac{12(3Hh_0+2Hh)}{md'h^4+18C_0WD}=\frac{12\times(3\times42.2\times0.2+2\times42.2\times2.7)}{4000\times1.8\times2.7^4+18\times10\,800\times0.785\,4\times2}=4.42\times10^{-3}$$

3）基础主柱转动中心到地面距离计算

$$x_A=\frac{md'h^3(4M_0+3Hh)+6C_0HDW}{2md'h^2(3M_0+2Hh)}=\frac{d'h^2(4M_0+3Hh)+6HDW}{2d'h(3M_0+2Hh)}$$

$$=\frac{1.8\times2.7^2\times(4\times42.2\times0.2+3\times42.2\times2.7)+6\times42.2\times2\times0.7854}{2\times1.8\times2.7\times(3\times42.2\times0.2+2\times42.2\times2.7)}=2.164\text{m}$$

4）作用于基础底面的弯矩计算

$$M_h=Hh_0+Hh-d'\omega\frac{mh^3}{12}(2x_A-h)$$

$$=42.2\times0.2+42.2\times2.7-1.8\times4.42\times10^{-3}\times\frac{4000\times2.7^3}{12}\times(2\times2.164-2.7)$$

$$=37.400\text{kN}\cdot\text{m}$$

5）基础底面压力计算。

基础自重和基础底面正上方土的重力：

$$G=G_f+G_0=72.96+103.608=176.568\text{kN}$$

$$P=\frac{F+\gamma_G G}{A}=\frac{300+1.2\times176.568}{0.25\times\pi\times2^2}=162.94\text{kN}$$

$$P_{max}=\frac{F+\gamma_G G}{A}+\frac{M_h}{W}=162.94+\frac{37.400}{0.785\,4}=210.56\text{kPa}$$

$$P_{min}=\frac{F+\gamma_G G}{A}-\frac{M_h}{W}=162.94-\frac{37.400}{0.785\,4}=115.32\text{kPa}$$

（2）修正后的地基承载力特征值计算。一般黏性土，天然孔隙比 $e=0.8$，液性指数 $I_L=0.5$，查表可得，$f_{ak}=220\text{kN/m}^2$。

则修正后：

$$f_a=f_{ak}+\eta_b\gamma(b-3)+\eta_d\gamma_m(h-0.5)$$
$$=220+0.3\times18\times(3-3)+1.6\times18\times(2.7-0.5)$$
$$=220+0+63.36=283.36\text{kPa}$$

则 $f_a/\gamma_{rf}=283.36/0.75=377.81\text{kPa}$，$1.2f_a/\gamma_{rf}=1.2\times283.36/0.75=453.38\text{kPa}$

根据（1）和（2）可知：

$P<f_a/\gamma_{rf}$（162.94kPa<377.81kPa）

$P_{max}<1.2f_a/\gamma_{rf}$（210.56kPa<453.38kPa）

下压地基承载力满足要求。

4. 强度计算

（1）基柱配筋。

1）基柱控制截面弯矩计算。基柱弯矩的控制截面在基柱底部，即图 9-63 的 x–x 截面，则：

$$M_x=Hh_0+Hx-d'\omega\frac{mx^3}{12}(2x_A-x)$$
$$=42.2\times0.2+42.2\times2.1-1.8\times2.007\,4\times10^{-3}\times\frac{4000\times2.1^3}{12}\times(2\times2.601-2.1)$$
$$=62.46\text{kN}\cdot\text{m}$$

2）配筋。关于圆柱的最小配筋率，说明如下：

①按照桩基规范的要求，灌注桩的最小配筋率不宜小于 0.2%～0.65%，小桩径取高值，大桩径取低值。

②按照混凝土结构设计规范的受压构件全部纵向受力钢筋，在钢筋强度等级 300MPa 时，最小配筋率 0.6%。

综合①、②，此处可取圆柱的最小配筋率为 0.6%。

按圆形截面的偏心受拉构件配筋计算考虑，如依据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》，根据式（9-177）及其说明来求解 A_s 的话，需要解超越方程，不能直接求得 A_s，实际计算时可先假设α，求 N，反复迭代，即可求解得到足够精度的α，再求 A_s。此迭代求解过程可编程实现。迭代求解的结果列于下：

$$\alpha=0.1700$$

$$A_s=1071.15\text{mm}^2<\rho_{min}A$$
$$=0.60\%\times0.25\times3.1415926\times1.0^2$$
$$=4712.39\text{mm}^2$$

故 A_s 由最小配筋率控制，取 4713mm²。

实际选配 13ϕ22，$A_s=4941.3\text{mm}^2$，实际配筋率为 0.629%，满足要求。

（2）底板强度。

1）x–x 截面（基柱下 0.1m 的截面）。

x–x 截面弯矩计算：

$$M_s=Hh_0+Hx-d'\omega\frac{mx^3}{12}(2x_A-x)$$
$$=42.2\times0.2+42.2\times2.2-1.8\times2.007\,4\times10^{-3}\times\frac{4000\times2.2^3}{12}\times(2\times2.601-2.2)$$
$$=62.78\text{kN}\cdot\text{m}$$

γ_1 为受拉区混凝土塑性影响系数，圆形截面时取 $1.60\times(0.7+60/0.5)=193.12$。

计算截面混凝土面积 $A_h=\pi0.6^2=1.131\text{m}^2$

混凝土计算截面弹性抵抗矩 $W_0=1/32\pi1.0^3=9.817\times10^{-2}\text{m}^3$

$T_E=240-0.25\times3.1415926\times1.0^2\times2.3\times24=196.6\text{kN}$

则 x–x 截面强度应满足式（9-199）的要求，即：

$$\frac{T_E}{A_h}+\frac{M_s}{\gamma_{1W_0}}=\frac{196.6}{1.131}+\frac{62.78}{193.12\times9.817\times0.01}$$
$$=173.828+3.311=177.139\text{kPa}\leqslant0.59f_t$$
$$=0.59\times1.27\times10^3=749.3\text{kPa}$$

钢筋锚固长度从 x–x 截面起算，素混凝土正截面受拉承载力满足要求。

2）y–y 截面（取基柱边截面）。根据式（9-201），计算如下：

a）底板在下压荷载作用时，其基底压力 P（不包括土及底板重）不得大于 P_0 值，以下分别计算 P 和 P_0：

$$P_{max}=\frac{N}{A}+\frac{M_h}{W}=\frac{300}{0.25\cdot\pi\cdot2^2}+\frac{63.065}{0.7854}=175.79\text{kPa}$$

$$P_{min}=\frac{N}{A}-\frac{M_h}{W}=\frac{300}{0.25\cdot\pi\cdot2^2}-\frac{63.065}{0.7854}=15.20\text{kPa}$$

$$P_c=P_{min}+\frac{(d+D)}{2D}(P_{max}-P_{min})$$
$$=15.20+\frac{(1.0+2.0)}{2\times2.0}\times(175.79-15.20)=135.64\text{kPa}$$

偏心受压，则

$$P=\frac{P_{max}+P_c}{2}=\frac{175.79+135.64}{2}=155.72\text{kPa}$$

混凝土等级为 C25，则 $f_t=1270\text{kPa}$；

$$\frac{\Delta h}{\Delta b}=\frac{0.6}{0.5}=1.2=\tan\delta$$

$$\delta = \arctan(1.2) = 0.8761$$

$$P_0 = \frac{\tan\delta - \delta}{\delta}(0.55 f_t)$$
$$= \frac{1.2 - 0.8761}{0.8761} \times (0.55 \times 1270) = 258.24\text{kPa}$$

综上可得，$P = 155.72\text{kPa} < P_0 = 258.24\text{kPa}$，满足要求。

b）底板在上拔荷载作用时，基础上平面净土压力计算：

$$M_x = Hh_0 + Hx - d'\omega\frac{mx^3}{12}(2x_A - x)$$
$$= 42.2 \times 0.2 + 42.2 \times 2.6 - 1.8 \times 2.0074 \times 10^{-3} \times \frac{4000 \times 2.6^3}{12}(2 \times 2.601 - 2.6)$$
$$= 63.078\text{kN} \cdot \text{m}$$

$$P_{max} = \frac{T_E}{A} + \frac{M_x}{W} = \frac{196.6}{0.25 \times (\pi \times 2^2 - \pi \times 1^2)} + \frac{63.078}{0.7364}$$
$$= 169.10\text{kPa} \leqslant P_0 = 190.86\text{kPa}$$

故上拔荷载作用时，底板强度也满足要求。

以上略去了上拔工况下 P_0 的计算过程，可参考下压工况的计算过程进行计算。

三、灌注桩基础

（一）主要计算内容和计算公式

灌注桩基础的主要计算内容和计算公式已在本章第五节中进行了详细阐述。

（二）计算例题

1. 设计条件

（1）工程地质。砾砂（密实、饱和），地下水位 −2.0m；地震基本烈度 6 度；$f_{ak} = 400\text{kN/m}^2$，$\varphi = 45°$，$c = 0$。

（2）水文。一般冲刷深度 0.4m，局部冲刷深度 1.5m；设计最高洪水位时，塔位淹没 1.9m，水的纵向平均流速 4.5m/s。

（3）基础作用力（标准值）。

1）最大风时（标准值）：

上拔：$T_E = 1340\text{kN}$　$T_x = 247\text{kN}$　$T_y = 263\text{kN}$

下压：$N = 1800\text{kN}$　$N_x = 343\text{kN}$　$N_y = 359\text{kN}$

2）最大风时（设计值）：

上拔：$T_E = 1340\text{kN}$　$T_x = 247\text{kN}$　$T_y = 263\text{kN}$

下压：$N = 1800\text{kN}$　$N_x = 343\text{kN}$　$N_y = 359\text{kN}$

3）设计最高洪水位与最大风组合时，荷载系数取 0.75：

a）风荷载（标准值）：

上拔：$T_E = 1005\text{kN}$　$T_x = 185\text{kN}$　$T_y = 197\text{kN}$

下压：$N = 1350\text{kN}$　$N_x = 257\text{kN}$　$N_y = 269\text{kN}$

b）动水压力（标准值）：

查表取圆形基形系数 $K_W = 0.8$，方形 $K_W = 1.5$。从而得

基柱动水压力 $F_1 = 0.75K_w\gamma_w v_w^2 / 2g = 0.75 \times 0.8 \times 10 \times 4.5^2 / 2 \times 9.81 = 6.2\text{kN/m}^2$

承台动水压力 $F_2 = 0.75 \times 1.5 \times 10 \times 4.5^2 / 2 \times 9.81 = 11.6\text{kN/m}^2$

c）漂浮物冲击力（标准值）。设漂浮物为圆木，长 7m，直径 0.8m，重力 $G = \pi \times 0.8^2 / 4 \times 7 \times 6.0 = 21\text{kN}$，冲撞时间取 $t = 1\text{s}$，则其冲击力为

$$F_m = Gv_w / gt = 21 \times 4.5 / 9.81 \times 1 = 9.6\text{kN}$$

（4）材料。混凝土强度等级采用 C25，纵向受力钢筋采用 HRB400，其余采用 HPB300。

（5）基础型式及尺寸。

1）型式：灌注桩群桩基础（图 9-64）。

2）基本尺寸：

$h = 10\text{m}$，$h_2 = 2.0\text{m}$，$h_t = 1.9\text{m}$，$B = 5.0\text{m}$，$r_1 = 1.5\text{m}$，$r_2 = 0.8\text{m}$，$S = 2.8\text{m}$，$D_0 = 0.8\text{m}$，$C = 1.1\text{m}$。

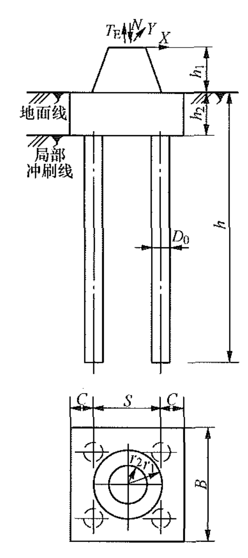


图 9-64　灌注桩基础外形

（6）适用塔型：直线塔。

2. 基础自重计算

墩台 $G_f = [(1.5^2 + 0.8^2 + 1.5 \times 0.8) \times \pi \times 1.9 / 3 + 5^2 \times 2] \times 24 = 1400\text{kN}$

洪水时　$G_f' = 58.1 \times 14 = 810\text{kN}$

基柱　$G_f' = 0.503 \times 14 = 7.0\text{kN/m}$

3. 桩基下压承载力特征值计算

（1）基本参数计算。

1）该桩为等直径桩，桩身周长 $u = \pi D_0 = 2.513\text{m}$，桩端面积 $A_p = 0.503\text{m}^2$。

2）桩周土仅一层，砾砂（密实、饱和），地下水

位–2.0m，$l_1=10-2.0=8.0$m，桩身全部在水位以下，查表 9-63 得其对应的极限侧阻力标准值 $q_{sik}=116\sim130$kPa，取 116kPa，查表 9-65 得其对应的极限端阻力 $q_{pk}=1400\sim2000$kPa，取 1700kPa。

3）桩径 0.8m，属于大直径桩，按表 9-66 计算大直径灌注桩侧阻和端阻的尺寸效应系数，可得 ψ_{si} 和 ψ_p 均为 1.0。

4）桩中心距与桩径之比为 3.5，承台宽度与桩长之比为 0.625，查表 9-62 得承台效应系数 η_c 为 0.138。

5）基桩所对应的承台底净面积

$$A_c=\left(A-nA_{ps}\right)/n=\left(25-4\times0.503\right)/4=5.747\text{m}^2$$

（2）下压承载力特征值计算。

$$Q_{uk}=Q_{sk}+Q_{pk}=u\sum\psi_{si}q_{sik}l_i+\psi_p q_{pk}A_p$$
$$=2.513\times1.0\times116\times8.0+1.0\times1700\times0.503$$
$$=3187.2\text{kN}$$

单桩竖向承载力特征值 $R_a=Q_{uk}/K=1593.6$kN

考虑承台效应的复合基桩竖向承载力特征值

$$R=R_a+\eta_c f_{ak}A_c=1593.6+0.138\times400\times5.747$$
$$=1593.6+317.2=1910.8\text{kN}$$

4. 桩基上拔承载力允许值计算

（1）基本参数计算。

1）该桩为等直径桩，桩身周长 $u=\pi D_0=2.513$m。

2）桩周土仅一层，砾砂（密实、饱和），地下水位–2.0m，$l_i=10-2.0=8.0$m，桩身全部在水位以下，查表 9-63 得其对应的极限侧阻力标准值 $q_{sik}=116\sim130$kPa，取 116kPa。

3）桩周土仅一层，按砂土，查表 9-68 得抗拔系数 λ 为 0.7。

4）基桩自重 $G_P=14\times0.503\times8=56.336$kN。

5）桩群外围周长 14.4m，群桩基础所包围体积的桩土总自重除以总桩数，即 $G_{gp}=10\times(2.8+0.8)^2\times8.0/4=259.2$kN。

（2）上拔承载力允许值计算。

$$T_{uk}=\sum\left(\lambda_i q_{sik}u_i l_i\right)=0.7\times116\times2.513\times8=1632.4\text{kN}$$

$$\left[T_{k1}\right]=T_{uk}/K+G_p=1632.4/2.0+56.3=872.5\text{kN}$$

$$T_{gk}=\frac{1}{n}U_l\sum\left(\lambda_i q_{sik}l_i\right)=\frac{1}{4}\times14.4\times0.7\times116\times8=2338.6\text{kN}$$

$$\left[T_{k2}\right]=T_{gk}/K+G_{gp}=2338.6/2.0+259.2=1428.5\text{kN}$$

$$\left[T_k\right]=\min\left(\left[T_{k1}\right],\left[T_{k2}\right]\right)=872.5\text{kN}$$

5. 上拔工况时桩顶荷载效应及位移计算

在上拔工况下依据式（9-68）可得各桩最大的上拔力如下：

$$N_{ikmax}=\frac{F_k+G_k}{n}+\frac{M_{xk}y_i}{\sum y_j^2}+\frac{M_{yk}x_i}{\sum x_j^2}$$
$$=132.5+102.6+113.8=348.9\text{kN}$$

易知 $N_{ikmax}\leqslant[T_k]$

在上拔工况基础作用力标准值作用下按表 9-74 计算后易得各桩桩顶位移，其中最大位移为 3mm。

6. 下压工况时桩顶荷载效应及位移计算

在下压工况基础作用力标准值作用下按表 9-74 计算后，可得各桩桩顶内力，其中最大值 $N_{kmax}=1286\leqslant1.2R=2292.96$kN

各桩桩顶位移的最大值为 2.8mm。

7. 桩基水平承载力、承台内力和桩身配筋计算

在基础作用力设计值作用下，分别考虑上拔工况和下压工况按表 9-74 计算后，可得基桩的桩顶内力及桩身最大弯矩，此处省略桩基配筋计算和承台内力及配筋计算。

最高洪水位与最大风组合条件，计算与最大风设计条件相同，故本例从略。

四、岩石锚桩基础

（一）主要计算内容和计算公式

岩石锚桩基础的主要计算内容和计算公式已在本章第五节中进行了详细阐述。

（二）计算例题

岩石锚桩基础型式常见的有直锚式、承台式、嵌固式等，本小节给出直锚式岩石锚桩基础的算例。对于承台式岩石锚桩基础的计算，其承台下压地基承载力计算、承台底板的上、下配筋计算、基柱配筋计算等均可参考灌注桩基础的承台计算理论进行，此节不再赘述。嵌固式岩石锚桩基础计算较为简单，此小节亦略去。

1. 设计条件

（1）工程地质：石英砂岩，微风化。

（2）基础作用力：上拔力设计值 $T_E=138$kN 。

（3）材料：砂浆强度等级采用 $M30$，钢筋采用 HRB400。

（4）适用塔型：直线塔。

2. 基础型式

（1）型式：直锚式岩石锚桩（图 9-65）。

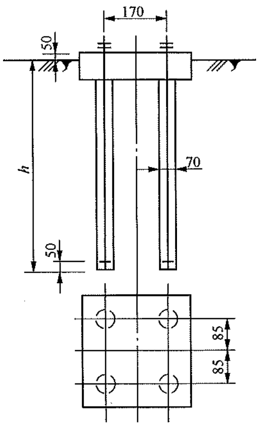


图 9-65 岩石锚桩基础外形

（2）基本尺寸：地脚螺栓选用4个M24，地脚螺栓间距为170mm且与设计上拔力呈对称布置。按基础构造要求：取地脚螺栓在基岩中的锚固长度 $h_0 = 25d = 25\times2.4 = 60\text{cm}$；锚孔直径 $D = 2\sim3d$，取 $D = 7\text{cm}$。

3. 强度计算

（1）地脚螺栓与砂浆的黏结强度按式（9-210）计算：

对M20强度等级的砂浆取 $\tau_a = 2500\text{kN/m}^2$，从而

$$\gamma_f T_i = 1.1\times138/4 = 38.0\text{kN} < \pi d h_0 \tau_a$$
$$= \pi\times0.024\times0.6\times2500 = 113.04\text{kN}$$

（2）锚桩与岩石间粘结强度按式（9-211）计算：

取 $\tau_b = 700\text{kN/m}^2$，则

$$\gamma_f T_i = 38.0\text{kN} \leqslant \pi D l_b \tau_b$$
$$= \pi\times0.07\times0.6\times700 = 92.3\text{kN}$$

（3）岩石的抗剪强度：由于锚桩间距 $b = 17\text{cm} < 3D = 21\text{cm}$ 的要求，则符合式（9-212）、式（9-214）的要求。

由表9-61查得 $\tau_s = 80\text{kN/m}^2$，从而得

单根锚桩：

$$\gamma_f T_E = 38.0\text{kN} \leqslant \pi h_0 \tau_s (D + h_0)$$
$$= \pi\times0.6\times80\times(0.07+0.6) = 101.0\text{kN}$$

群锚桩：$a = \sqrt{2}b + D = \sqrt{2}\times17 + 7 = 31\text{cm}$，故得

$$\gamma_f T = 1.1\times138 = 151.8\text{kN} > \pi h_0 \tau_s (a + h_0) + G_f$$
$$= \pi\times0.6\times80\times(0.31+0.6) = 137.2\text{kN}$$

岩石群锚整体抗剪承载力不满足要求，则加大锚桩锚固深度，取 $h_0 = 80\text{cm}$，则得

$$\gamma_f T = 1.1\times138 = 151.8\text{kN} < \pi h_0 \tau_s (a + h_0) + G_f$$
$$= \pi\times0.8\times80\times(0.31+0.8) = 223.1\text{kN}$$

由于为直锚型，最后确定 $h_0 = 0.8\text{m}$，地脚螺栓伸至锚桩底部以上50mm位置。

五、装配式基础

（一）一般要求和基本型式

装配式基础，又称预制基础，是工厂预制，现场装配的基础型式，属于开挖类基础的一种。它比现浇混凝土基础节省较多的劳动力，能大幅度缩短工期，且基础质量有保证，施工作业受季节气候影响小，有利于机械化或半机械化作业，可降低施工人员的作业风险，是输电线路基础施工的发展方向之一。

1. 一般要求

（1）型式选择：装配式基础适用于缺水及砂石采集较困难且运输条件较好的地区。设计时，必须因地制宜地做好基础类型选择，并根据塔位附近的运输条件，选定单个构件的最大运输重量和规格，部件的外形力求简单。

（2）装配式基础的上拔、下压稳定和强度计算除应符合本章第一节至第五节的有关规定外，还应结合装配式基础的特点确定符合实际受力情况的计算简图。

（3）底板侧向稳定，除设计上保证必要的倾覆稳定计算外，在施工工艺方面必须有相应措施，确保回填土的夯实质量，以防底板侧向滑移。

（4）装配式基础的预制构件宜在工厂加工，有条件时应尽量采用预应力钢筋混凝土构件。

（5）部件间的连接节点宜少而简单，且宜采用穿孔方式连接，孔位应考虑加工的误差。当采用预埋件连接时，应考虑凸出部分铁件的防碰撞措施。

2. 基本型式

装配式基础根据材料和装配型式分类，有以下常用几种类型：

（1）直柱单盘类。直柱单盘类系基柱与单一底盘（板或壳）组成的装配式钢筋混凝土基础。

1）直柱固接型（图9-66）：基柱由离心制造的钢筋混凝土环形截面柱（d=300～400mm）或方形截面柱与底盘用法兰盘刚性连接。曾在220kV及其以下线路工程中广泛地应用在无地下水的较好地基的直线塔位上，宜用于风化岩石或坚硬地基土壤的悬垂型杆塔。

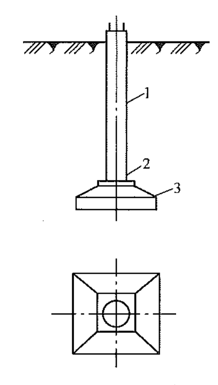


图9-66　直柱固接型

1—基柱；2—法兰盘；3—底盘

2）直柱铰接型（图9-67）：由离心制造的钢筋混凝土环形截面基柱（d=300～400mm）与底盘用U型螺栓或扁钢连接形成铰式连接，根据基柱的侧向稳定要求，分设有卡盘和无卡盘的两种构造型式。

直柱铰接型装配式钢筋混凝土基础，曾在330kV线路工程中广泛地应用在较好地基塔位上，可用于基坑易深挖、土质均匀的地基。

（2）塔腿埋入类（图9-68）。此类系塔腿直接伸入基坑底部与底盘连接的混合式基础，塔脚与底盘铰接。底盘基本上处于轴心拉、压的受力状态，其内力和强度计算与普通钢筋混凝土底板相同。底盘可用锥壳或平底盘，一般用于悬垂型杆塔。

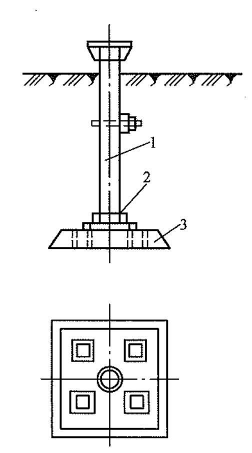


图 9-67 直柱铰接型

1—基柱；2—柱脚；3—底盘

该型基础曾用于风化岩石地基的直线塔塔位。对钢材有腐蚀和冻胀土质地基不宜采用，如采用时，必须有可靠的防腐和对塔腿角钢有防冻胀抗变形的可靠措施。

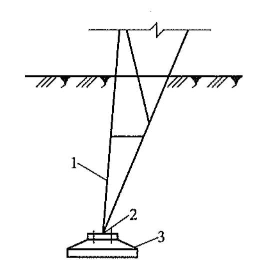


图 9-68 塔腿埋入型

1—塔腿；2—塔脚；3—底盘

（3）角锥支架类。此类系由角锥支架基柱和底板组成的基础型式，支架顶部和塔脚连接，支架底部与底板连接，底板均由多根板条或类似轨枕的构件组成。根据材料可分为金属支架型和钢筋混凝土支架型。宜用于地基承载力较高的地区。

1）金属支架型（图 9-69）：系由铰接的金属支架与钢筋混凝土板条上的横梁形成铰接的空间结构。支架的受力状态系桁架体系，底板的受力状态系梁板体系。

该型基础曾应用在荷载较大的直线塔位和转角塔塔位上。

2）钢筋混凝土支架型（图 9-70）：系由铰接的钢筋混凝土支架与轨枕式底板上的横梁形成铰接的空间结构。其内力分析均与金属支架相同。曾应用在 220～330kV 工程中的直线和小转角塔位上。

（4）金属基础（图 9-71）。这种基础也称花窗式金属基础，是由塔腿主材直接延伸到基坑底部与花窗式金属底板及底板上的斜撑共同连接而成。其内力计算是按经验公式，与一般基础计算不同。

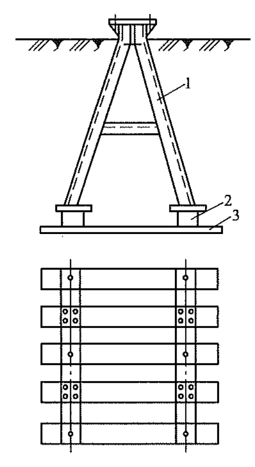


图 9-69 金属支架型

1—金属支架；2—横梁；3—板条

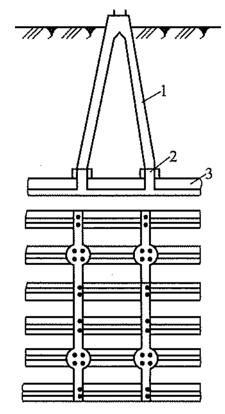


图 9-70 钢筋混凝土支架型

1—支架；2—横梁；3—轨枕板条

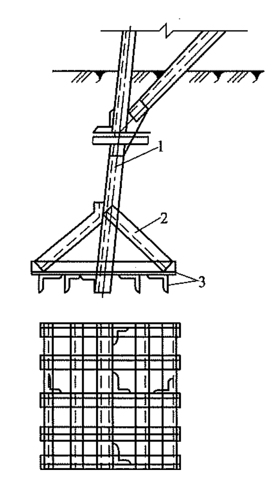


图 9-71 金属基础

1—塔腿主材；2—斜撑；3—金属板条

金属基础可全部由角钢组成，运输单件质量轻，最适用于运输条件十分困难的高大山区的塔位，曾广泛地应用在直线塔基上。金属基础宜用于地质条件较好的

山区悬垂型杆塔，也适用于突发倒塔事故的抢险工程中。

（二）装配式基础的主要计算内容

装配式基础的计算内容主要包含上拔稳定计算、地基下压承载力计算和构件的内力及强度计算等，其计算应符合本章第一节至第五节相关要求。对于直柱铰接型基础尚应进行侧向倾覆稳定计算和侧向滑动稳定计算。

（三）内力和侧向稳定计算

装配式基础属于大开挖基础，其上拔稳定、下压地基承载力计算应符合本章第一节至第四节中相关内容，不再赘述，本节结合装配式基础的特点，给出部分基础型式的内力和侧向稳定的计算方法。

1. 直柱铰接型基础

如图 9-72 所示，该基础的计算简图是基柱与底板以不能移动的铰相连接，在构造上必须保证有铰接性能。按设计水平荷载的大小和地质条件分为设置卡盘和不设卡盘两种计算简图，可分别按下列方法计算。

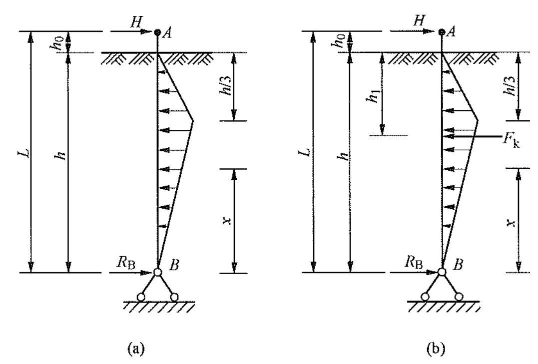


图 9-72　直柱铰接型基础侧向稳定计算简图
（a）无卡盘基柱；（b）有卡盘基柱

（1）主柱的倾覆稳定计算。

$$\sigma_{max} \leqslant \frac{mhk_0}{3\gamma_f} \tag{9-255}$$

式中　σ_{max} ——基柱侧向最大土压力，kN/m²，可按式（9-263）、式（9-264）计算；

m ——土压力参数，kN/m³，可按表 9-41 取值；

h ——设计地面至底板上平面（铰支点）的距离，m；

k_0 ——基柱的宽度增大系数，可按表 9-42 采用；

γ_f ——倾覆稳定设计附加分项系数，可按表 9-7 取值。

（2）底板侧向滑动稳定计算。

1）当基础上拔时：

$$K_h \leqslant \frac{T_E - \gamma_G Q_f}{R_B}\mu \tag{9-256}$$

2）当基础下压时：

$$K_h \leqslant \frac{N_a + \gamma_G Q_f}{R_B}\mu \tag{9-257}$$

式中　K_h ——基础侧向滑动稳定的设计附加分项系数，可按表 9-83 取值；

R_B ——基柱铰支点 B 的反力，kN，可按式（9-267）计算；

Q_f ——基础自身的重力，kN；

μ ——上拔和下压时，土与基础接触面间的摩阻系数，一般由试验确定，当无法验资时可参考表 9-84 取值，上拔时取小值；

T_E、N_a ——分别为作用于基础顶面的设计上拔力和下压力，kN。

表 9-83　基础滑动稳定的设计附加分项系数 K_h

杆塔模式	K_h
悬垂型杆塔	0.85
耐张直线（0° 转角）及垂悬转角杆塔	0.90
耐张转角、终端及大跨越杆塔	1.0

表 9-84　土与混凝土基础的摩阻系数

土的类别		μ
黏性土	可塑	0.25
	硬塑	0.25～0.3
	坚硬	0.3～0.4
砂土		0.4
碎石土		0.4～0.5
软质岩石		0.4～0.6
表面粗糙的硬质岩石		0.6～0.7

3）基柱内力 M_{max}、Q_{max} 计算。

a）基柱最大弯矩 M_{max}。

无卡盘基柱［见图 9-72（a）］：

当 $h_0 < 0.1h$ 时

$$M_{max} = 0.0363H\sqrt{\frac{(4h+9h_0)^3}{L}} \tag{9-258}$$

当 $h_0 = 0.1h$ 时

$$M_{max} = 0.375Hh \tag{9-259}$$

有卡盘基柱［图 9-72（b）］：

当具有卡盘横向作用力，$h_1 > h/3$ 时

$$M_{max} = (h-h_1)\left[R_B - \frac{b_0}{4h}(h-h_1)^2\sigma_{max}\right] \tag{9-260}$$

当 $h_1 < h/3$ 时

$$M_{\max}=H(h_0+h_1)-\frac{b_0h_1^3}{2h}\sigma_{\max} \qquad (9\text{-}261)$$

当 $h_1=h/3$， $h_0\leqslant 0.1h$ 时

$$M_{\max}=0.44Hh-0.02b_0h^2\sigma_{\max} \qquad (9\text{-}262)$$

式中 H ——作用于基柱顶面的设计水平力，kN；

h ——设计地面至铰支点 B 的高度，m；

h_1 ——设计地面至卡盘的高度，m，一般取 $h_1=h/3$；

h_0 ——基柱顶面至设计地面的高度，m，一般 $h_0\leqslant 0.1h$；

b_0 ——基柱的宽度或直径，m；

$\sigma_{\max}$ ——有卡盘基柱侧向最大土压力，kN/m²，可按式（9-264）计算；

其他符号含义与式（9-255）、式（9-257）相同。

b）基柱的侧向土压力 $\sigma_{\max}$：

无卡盘基柱时为

$$\sigma_{\max}=\frac{18HL}{5b_0h^2} \qquad (9\text{-}263)$$

有卡盘基柱时为

$$\sigma_{\max}=\frac{HL}{\frac{5}{18}b_0h^2+\eta_k(h-h_1)A_k} \qquad (9\text{-}264)$$

式中 η_k ——卡盘埋深与基柱埋深有关的比例系数，当 $h_1>h/3$ 时，$\eta_k=\frac{3(h-h_1)}{2h}$；当 $h_1\leqslant h/3$ 时，$\eta_k=3h_1/h$；

A_k ——卡盘的侧面面积，m²，可按式（9-265）、式（9-266）计算；

其他符号含义与式（9-260）～式（9-262）相同。

c）卡盘的侧面面积 A_k：

$$A_k=\frac{3\gamma_f H(h_0+h)-\frac{5}{18}K_0mb_0h^3}{K_0mh^2} \qquad (9\text{-}265)$$

当 $h_0=h/10$， $h_1=h/3$ 时

$$A_k=\frac{4.95\gamma_f H-0.42K_0mb_0h^3}{K_0mh^2} \qquad (9\text{-}266)$$

式中：γ_f、K_0、m 与式（9-255）相同，其他符号含义与式（9-261）相同。

d）基柱底部支点 B 反力 R_B：

无卡盘基柱［图 9-72（a）］为

$$R_B=\frac{1}{2}b_0h\sigma_{\max}-H \qquad (9\text{-}267)$$

当 $h_0\leqslant h/10$ 时， $R_B=H$ (9-268)

有卡盘基柱［图 9-72（b）］为

$$R_B=\frac{1}{2}b_0h\sigma_{\max}+F_k-H \qquad (9\text{-}269)$$

当 $h_1=h/3$ 时， $R_B=\frac{mhK_0}{3\gamma_f}(0.5b_0h+A_k)=H$ (9-270)

式中 F_k ——卡盘的横向作用力，kN，可按式（9-273）、式（9-274）计算；

A_k ——卡盘的侧面面积，m²，选定的 A_k 不宜大于 1.1 倍计算值；

其他符号含义与式（9-260）～式（9-262）相同。

e）支点 B 至最大弯矩点的距离 χ。

无卡盘基柱［图 9-72（a）］可按下式计算，即

$$\chi=h\sqrt{\frac{2(4h+9h_0)}{27(h+h_0)}} \qquad (9\text{-}271)$$

f）基柱的最大剪力 $Q_{\max}$：

当 $h_0\leqslant h/10$ 时， $Q_{\max}=H=R_B$ (9-272)

g）卡盘的横向力 F_k：

$$F_k=\mu_k\sigma_{\max}A_k \qquad (9\text{-}273)$$

当选定的 A_k 不大于 1.1 倍计算的 A_k，且 $h_1=h/3$ 时

$$F_k=\frac{mhK_0}{3\gamma_f}A_k \qquad (9\text{-}274)$$

式中符号含义与式（9-261）相同。

2. 角锥支架型基础

角锥支架型基柱属桁架体系，分为角钢支架和钢筋混凝土支架，可按轴心受力构件验算其承载力和稳定性。其内力计算如下。

（1）基柱支架（见图 9-73）。基柱支架的轴向压力 N_{a1} 和轴向拉力 T_{E1} 可分别按下式计算：

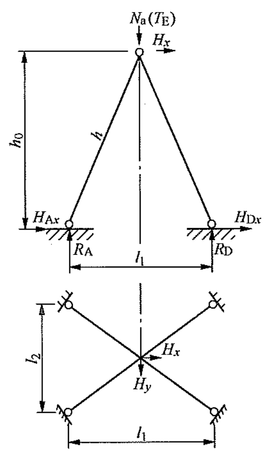


图 9-73 角锥支架型基柱计算简图

$$\left.\begin{aligned}N_{a1}&=\left(\frac{N_a}{4}+\frac{H_xh_0}{2l_1}+\frac{H_yh_0}{2l_2}\right)\frac{h}{h_0}\\T_{E1}&=\left(\frac{T_E}{4}+\frac{H_xh_0}{2l_1}+\frac{H_yh_0}{2l_2}\right)\frac{h}{h_0}\end{aligned}\right\} \qquad (9\text{-}275)$$

式中 T_E、N_a ——分别为作用于基础顶面的上拔力和下压力设计值，kN；

H_x、H_y ——分别为作用于基础顶面的 X 轴和 Y 轴方向的水平力设计值，kN；

h_0、h ——分别为基柱构件的垂直高和实长，m；

l_1、l_2 ——分别为基柱构件下平面的正面（X 向）和侧面（Y 向）的根开，m。

A、B、C、D 支点反力 $H_{Ax} \sim H_{Dx}$ 和 $H_{Ay} \sim H_{Dy}$ 等，可按对应构件轴向力在 $X-X$ 和 $Y-Y$ 方向投影计算。

（2）底板的计算荷载、支座反力和内力计算（图 9-74）。

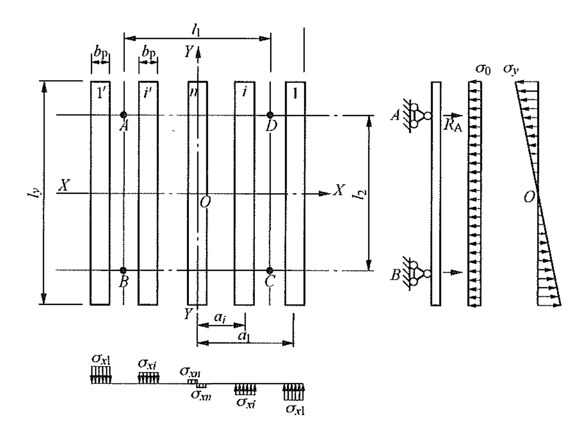


图 9-74 板条荷载计算简图

图中板条上标注的 1、i、n 为板条的编号

1）计算荷载。底板单位面积的净土反力

$$\sigma_0 = (N_a + \gamma_f Q_f) / \sum A \tag{9-276}$$

$$\sigma_{xi} = F_{Hx} h a_i / I_y \tag{9-277}$$

$$\sigma_y = F_{Hy} h / W_x \tag{9-278}$$

底板单位长度的净土反力为

$$\left.\begin{aligned} q_0 &= \sigma_0 b_p \\ q_{x1} &= (\sigma_0 + \sigma_{x1}) b_p \\ q_{xi} &= (\sigma_0 + \sigma_{xi}) b_p \\ q'_{xi} &= (\sigma_0 - \sigma_{xi}) b_p \\ q'_{x1} &= (\sigma_0 - \sigma_{x1}) b_p \\ q_y &= \sigma_y b_p \end{aligned}\right\} \tag{9-279}$$

式中 q_0 ——中心荷载作用下各板单位长度的净土反力，kN/m；

q_{xi}、q'_{xi} ——作用于 i 板和 i' 板上单位长度的净土反力，kN/m；

b_p ——板条的宽度，m；

q_y ——由 M_y 在板条上产生的单位长度净土反力，kN/m；

W_x ——各板条平面对 X 轴的抵抗矩，m³；

$\sum A$ ——各板条平面面积之和，m²；

I_y ——各板条平面对 Y 轴的惯性矩，m⁴，如图 9-74 所示，$I_y = I_{ny} + 2\left(\sum_{i=1}^{n-1} I_{iy} + b_p l_y \sum_{i=1}^{n-1} a_i^2\right)$；

a_i ——各板条的中心至 Y 轴的距离，m；

h ——底板底面至支架顶部的垂直高，m；

Q_f ——基柱支架和横梁自身的重力，kN；

l_y、l_x ——分别为底板轮廓的长度和宽度，m；

$$I_{ny} = I_{iy} = b_p^3 l_y / 12$$

其他符号含义与式（9-275）相同。

2）支座反力 R_A：取受力最大的板 1 计算

$$R_A = \frac{1}{2} l_y \left(q_{x1} + \frac{q_y l_y}{3 l_2} \right) \tag{9-280}$$

3）支座弯矩 M_{min} 为

$$M_{min} = -\frac{1}{8}(l_y - l_2)^2 \left[q_{x1} + \frac{q_y}{3}\left(2 + \frac{l_2}{l_y}\right) \right] \tag{9-281}$$

4）跨中弯矩 M_{max} 为

$$M_{max} = \frac{1}{8} q_{x1} l_2^2 \left[1 - \frac{(l_y - l_2)^2}{l_2^2} \right] \tag{9-282}$$

5）下压时支座剪力 Q 为

$$\left.\begin{aligned} Q_W &= \frac{1}{2}(l_y - l_2 - b_h)\left[q_{x1} + \frac{1}{2} q_y \left(1 + \frac{l_2 + b_h}{l_y} \right) \right] \\ Q_N &= \frac{1}{2}(l_y - l_2 + b_h)\left[q_{x1} + \frac{1}{2} q_y \left(1 + \frac{l_2 - b_h}{l_y} \right) - R_A \right] \end{aligned}\right\} \tag{9-283}$$

式中 b_h ——横梁的截面宽度，m；

其他符号含义与式（9-279）相同。

6）上拔时支座剪力 Q：以 q_{x1} 中之 $\sigma_0 = (T_E - \gamma_f Q_f) / \sum A$ 和 $b_h = 0$ 代入式（9-283）即可。

（3）横梁的荷载、支座反力和内力计算（见图 9-75）。

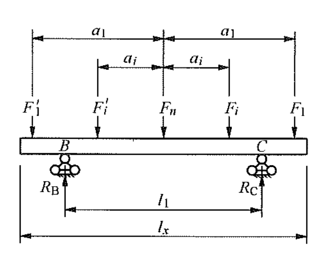


图 9-75 横梁受力计算示意图

1）横梁的荷载 F：

$$\left.\begin{aligned}F_1&=\frac{1}{2}q_{x1}l_y+\frac{1}{6}q_y l_y^2/l_2\\F_i&=\frac{1}{2}q_{xi}l_y+\frac{1}{6}q_y l_y^2/l_2\\F_n&=\frac{1}{2}q_0 l_y+\frac{1}{6}q_y l_y^2/l_2\\F_i'&=\frac{1}{2}q_{xi}'l_y+\frac{1}{6}q_y l_y^2/l_2\\F_1'&=\frac{1}{2}q_{xi}'l_y+\frac{1}{6}q_y l_y^2/l_2\end{aligned}\right\}\tag{9-284}$$

式中 F_1、F_1'——分别为 C 和 B 支座外侧集中荷载的总和，kN；

F_i、F_i'——分别为跨中 O 点至 C 点和 B 支座间的集中荷载的总和，kN；

F_n——跨中 O 点的集中荷载，kN，当板条偶数布置时，$F_n=0$；

其他符号含义与式（9-270）相同。

2）横梁支座反力 R_C：当板条与底板中心 O 点对称布置时

$$R_C=\frac{(F_1-F_1')s_1+(F_i-F_i')s_i}{l_1}+\frac{0.5(F_1+F_i+F_N+F_i'+F_1')l_1}{l_1}\tag{9-285}$$

式中 s_1——对应于 F_1、F_1' 集中荷载作用点至跨中 O 点的距离，m；

s_i——对应于 F_i、F_i' 集中荷载作用点至跨中 O 点的距离，m；

l_1——横梁的跨度，m；

其他符号的含义与式（9-284）相同。

3）横梁切力 Q：

$$Q_w=F_1\tag{9-286}$$

$$Q_N=F_1-R_C\tag{9-287}$$

式中 R_C——横梁 C 支座的反力，kN，可按式（9-285）计算。

4）横梁弯矩 M：

$$M_C=-F_1(s_1-l_1/2)\tag{9-288}$$

$$M_O=-F_1s_1-F_is_i+R_Cl_1/2\tag{9-289}$$

式中符号含义与式（9-285）相同。

注意式（9-288）、式（9-289）的 M_C 和 M_O 是图 9-75 特定计算示意图的表达式；式（9-284）～式（9-289）均是对于一组双梁而推导的，若考虑单根梁计算时，需除以 2。

3. 金属基础

花窗式金属基础（图 9-76）的组合型钢内力分析按主、次梁传力计算，可按下列经验公式计算：

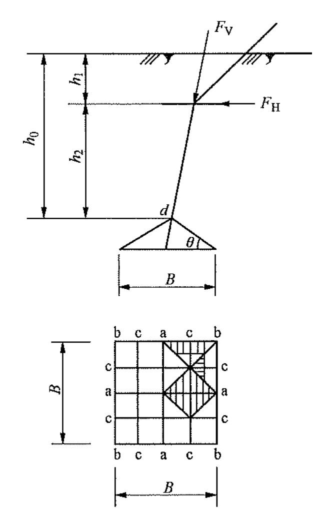


图 9-76 金属基础计算简图

（1）基柱最大弯矩 M_{max}

$$\left.\begin{aligned}M_x&=\frac{2}{7}(F_{H0x}-R_y)h_{2y}-M_0\\M_y&=\frac{2}{7}(F_{H0y}-R_x)h_{2x}-M_0\end{aligned}\right\}\tag{9-290}$$

式中 F_{H0x}、F_{H0y}——塔腿斜材在 X 和 Y 方向的水平分力设计值，kN；

R_y、R_x——分别为作用于 X 和 Y 方向横撑的土抗力，kN，$R_x=m_1b_yh_{1y}l_y$，$R_y=m_1b_xh_{1x}l_x$；

m_1——土压力系数，kN/m³，$m_1=\gamma_0\times\left[\tan^2\left(45°+\frac{\beta}{2}\right)-\tan^2\left(45°-\frac{\beta}{2}\right)\right]$，亦可按表 9-85 计算；

b_x、b_y——X 和 Y 方向横撑的角钢宽度，m；

l_x、l_y——X 和 Y 方向横撑的角钢长度，m；

h_{1x}、h_{1y}——X 和 Y 方向横撑的埋置深度，m；

γ_0——土的计算容重，kN/m³，可按表 9-41 取值；

β——土的计算内摩阻角，（°），可按表 9-41 取值；

h_{2x}、h_{2y}——X 和 Y 方向横撑至底板斜撑交点的高度，m；

M_0——基柱主材侧面土的抵抗力矩，kN·m，$M_0=\frac{1}{24}b_0h_0^3m_1$；

h_0——基柱主材的埋置深度（设计面至底板斜材支点 d 的深度，m）；

b_0——基柱主材角钢宽度，m。

表 9-85　　计算土压力系数的三角函数表

β (°)	$\tan\beta$	$\tan^2\beta$	$\tan^3\beta$	$\tan\left(45°-\frac{\beta}{2}\right)$	$\tan^2\left(45°-\frac{\beta}{2}\right)$	$\tan\left(45°+\frac{\beta}{2}\right)$	$\tan^2\left(45°+\frac{\beta}{2}\right)$	$\frac{4\tan\beta}{\cos\beta}$
0	0.000	0.000	0.000	1.0	1.0	1.0	1.0	0
5	0.087	0.007	0.001	0.916	0.84	1.09	1.19	0.349
10	0.176	0.031	0.005	0.839	0.704	1.192	1.421	0.715
15	0.268	0.072	0.019	0.767	0.588	1.303	1.698	1.110
18	0.325	0.106	0.034	0.727	0.528	1.380	1.890	1.366
20	0.364	0.133	0.048	0.700	0.490	1.430	2.040	1.549
22	0.404	0.163	0.066	0.675	0.455	1.480	2.200	1.742
24	0.445	0.198	0.088	0.649	0.422	1.540	2.370	1.947
25	0.466	0.217	0.101	0.637	0.406	1.570	2.460	2.056
26	0.488	0.238	0.116	0.625	0.391	1.60	2.560	2.173
28	0.532	0.283	0.151	0.601	0.361	1.66	2.770	2.411
30	0.577	0.333	0.192	0.577	0.333	1.73	3.000	2.663
32	0.625	0.391	0.244	0.554	0.307	1.80	3.250	2.948
34	0.675	0.456	0.308	0.532	0.283	1.88	3.540	3.256
35	0.700	0.490	0.343	0.521	0.271	1.92	3.690	3.416
36	0.727	0.529	0.384	0.510	0.260	1.96	3.850	3.549
38	0.781	0.610	0.476	0.488	0.238	2.05	4.20	3.964
40	0.839	0.704	0.591	0.466	0.217	2.15	4.62	4.380
42	0.900	0.810	0.729	0.445	0.198	2.25	5.04	4.842
44	0.966	0.933	0.901	0.425	0.180	2.36	5.55	5.371
45	1.000	1.000	1.000	0.414	0.171	2.41	5.81	5.656

注　$\frac{4\tan\beta}{\cos\beta}=\tan^2\left(45°+\frac{\beta}{2}\right)-\tan^2\left(45°-\frac{\beta}{2}\right)$

（2）横撑的最大弯矩 M_{max}。

Y 和 X 方向横撑

$$\left.\begin{aligned}M_x&=\frac{1}{8}m_1b_yh_{1y}l_y^2\\M_y&=\frac{1}{8}m_1b_xh_{1x}l_x^2\end{aligned}\right\}\tag{9-291}$$

（3）底板内力。底板由纵横各 5 根计算长度相等的角钢组成（图 9-76）。现分别计算如下：

1）$a-a$ 构件：除中间与基柱材连接外，其两端以斜撑支持，承受图 9-76 方形阴影部分的地基的净土反力。其轴心压力 F_{va} 和弯矩 M_a 可按下式计算：

$$F_{va}=\frac{23F_{v0}}{128\tan\theta}\tag{9-292}$$

$$M_a=\frac{19}{1536}F_{v0}l\tag{9-293}$$

式中　F_{v0}——基柱材在 h_1 深度以下的轴向压力，kN；

θ——斜撑与底板水平材的夹角，（°）；

l——底板水平材的长度，m。

2）$b-b$ 构件：在中间与 $a-a$ 连接，承受图 9-76 梯形阴影部分的地基的净土反力：

$$M_b=\frac{7}{512}F_{v0}\tag{9-294}$$

3）$c-c$ 构件：在中间与 $a-a$ 连接，两端与 $b-b$ 连接，承受图 9-76 三角形阴影部分地基的净土反力：

$$M_c=\frac{1}{512}F_{v0}\tag{9-295}$$

4）斜撑轴向力 F_{vd}：

$$F_{vd}=\frac{23F_{v0}}{128\sin\theta}\tag{9-296}$$

式中符号含义与式（9-293）相同。

（四）强度计算和构件的构造要求

1. 强度计算

（1）钢结构构件。构件的连接计算可参照第八章的有关规定，构件的强度可按下列各式计算：

1）轴心受力构件：

$$\sigma = F_V / A_n \leqslant mf \tag{9-297}$$

2）受弯构件：

$$\sigma = \frac{M_x}{W_y} + \frac{M_y}{W_x} \leqslant f \tag{9-298}$$

3）偏心受力构件：

$$\sigma = \frac{F_V}{A_c} + \frac{M_x}{W_y} + \frac{M_y}{W_x} \leqslant f \tag{9-299}$$

（2）钢筋混凝土预制构件。构件的强度计算应按本章第四节钢筋混凝土构件强度计算的有关公式进行。构件的连接可参照第八章的有关规定。

2. 构造要求

钢结构构件除应符合第八章和钢筋混凝土预制构件符合本章的基础构造要求外，结合装配式基础的特点尚应符合下述构造要求。

（1）角锥支架类基础的主材准线在构造上宜交于顶板面上，支架与横梁的连接，在构造上尽量避免横梁受扭，否则横梁截面须配置抗扭箍筋。

（2）装配式基础底板的钢筋混凝土板条间距不宜大于 150mm；花窗式金属底板的方形空格不宜大于 300mm×300mm。在底板空格和板条间隔的上部宜放置一层大于 150mm 的大块石。底板下部为岩石地基时，应垫以 50～100mm 的砂垫层。

（3）直柱单盘型立柱宜采用直径为 300～400mm 的离心钢筋混凝土（C40 级）环形截面。

（4）人字型主柱尺寸不小于 150mm×150mm，主筋保护层不小于 25mm，端部 2～3 倍柱宽的长度范围内箍筋加密，箍筋间距宜为 50～100mm。

（5）金属基础花窗之间间隔不应大于 400mm×400mm，底板下需设置 100～200mm 厚的砂、细石垫层或浇注低混凝土强度等级的填层，花窗底板上回填大石块、回填时底板与坑壁间，以及横撑处应填块石挤实。

（6）直插式金属基础主柱规格不得小于塔腿下部主材的规格，主柱角钢厚度不宜小于 6mm，预埋钢板的厚度不宜小于 6mm，锚筋直径不宜小于 8mm。

（7）锥壳底盘的混凝土强度等级不应低于 C25，宜采用 C30，非预应力混凝土壳体的配筋采用 HRB335、HRB400 级钢筋，钢筋直径不小于 6mm，钢筋保护层壳壁不得小于 20mm，底部不得小于 25mm。

（8）锥壳底板厚度不得小于 100mm，侧锥壳底部受压时不得开孔，锥壳内外交角宜作成弧形。

（9）壳体配筋按内力计算配置径向和环向钢筋，边梁配筋要加强，壳内锚固径向钢筋的环箍直径宜采用 20～30mm，当环箍直径受限制时，可用环箍加焊十字撑，壳壁按构造配置的钢筋，当壁厚小于 100mm 时，其直径采用 6mm，此时其间距不应大于 200mm。

（10）锥壳在放置螺栓及拉环等处配置钢筋应局部加强。

（11）正锥壳底盘施工时应做好壳中土胎的夯实处理，使锥壳在受压时能均匀受力。

（12）装配式基础自重较轻，特别要注意回填土的夯实质量，设计要对施工工艺提出相应的要求。

（13）直接埋入土中的金属件适当加大直径或加厚，除热镀锌外可根据腐蚀程度，采取相应防腐措施。

（五）计算例题

1. 设计条件

（1）工程地质：中砂（密实、稍湿），$\gamma = 17\text{kN/m}^3$（无地下水），$f_{ak} = 300\text{kN/m}^2$

（2）基础作用力设计值：

$F_T = 372.2\text{kN}$，$F_{Hx} = 50.7\text{kN}$，$F_{Hy} = 37.1\text{kN}$；

$F_V = 506.6\text{kN}$，$F_{Hx} = 65.8\text{kN}$，$F_{Hy} = 46.6\text{kN}$。

（3）材料：混凝土强度等级采用 C30；钢筋采用 HPB300 级钢筋；型钢采用 Q345。

（4）适用塔型：直线塔，根开 $L = 7.58\text{m}$。

2. 基础型式

（1）型式：板条式装配式基础。

（2）基本尺寸如图 9-77 所示。

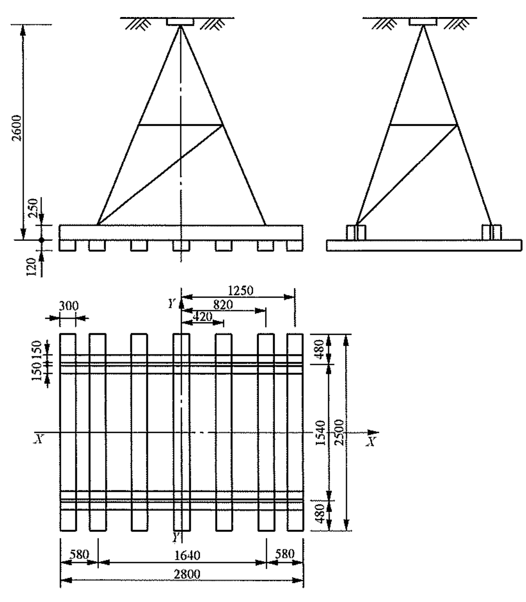


图 9-77　板条装配式基础外形（单位：mm）

（3）基础自重力：

横梁　$G_1 = 0.15 \times 0.25 \times 2.8 \times 4 \times 24 = 10.1\text{kN}$

板条　$G_2 = 0.12 \times 0.3 \times 2.5 \times 7 \times 24 = 15.1\text{kN}$

钢支架　$G_3 = 4.2\text{kN}$

3. 上拔稳定计算

按表9-12，砂的计算上拔角取$\alpha=25°$，$\gamma_s=17\text{kN/m}^3$由此得

$$\gamma_f T_E=1.10\times372.2=409.42\text{kN}$$

$$H_E/T_E=\sqrt{T_x^2+T_y^2}/T_E$$
$$=\sqrt{50.7^2+37.1^2}/372.2=0.169$$

$$\gamma_E=1.0-\frac{0.1}{0.25}\times(0.169-0.15)=0.9924$$

$$\gamma_s=17\text{kN/m}^3$$
$$\gamma_{\theta1}=1.0$$
$$h_t=2.6\text{m}$$
$$h_c=2.5D=2.5\times0.6\times(2.8+2.5)$$
$$=7.95\text{m}>h_t=2.6\text{m}$$

$h_t\leqslant h_c$则

$$V_t=h_t\left[l_y l_x+(l_y+l_x)h_t\tan\alpha+\frac{4}{3}h_t^2\tan^2\alpha\right]$$

$$=2.6\times\left[\begin{array}{l}2.5\times2.8+(2.5+2.8)\times2.6\tan25°+\\ \frac{4}{3}\times2.6^2\tan^2 25°\end{array}\right]$$

$$=40.00\text{m}^3$$

$$L=7.58\text{m}$$

$$B+2h_t\tan\alpha=2.8+2\times2.6\times\tan25°=5.22\text{m}$$

$$L>B+2h_t\tan\alpha$$

则$\Delta_{Vt}=0$

$$V_0=0.15\times0.25\times2.8\times4=0.42\text{m}^3$$

$$Q_f=G_1+G_2+G_3=10.1+15.1+4.2=29.4\text{kN}$$

$\gamma_E\gamma_s\gamma_{\theta1}(V_t-\Delta_{Vt}-V_0)+Q_f=0.9924\times17\times1.0\times(40.00-0-0.42)+29.4=697.15\text{kN}$ 故 $\gamma_f T_E\leqslant\gamma_E\gamma_s\gamma_{\theta1}(V_t-\Delta_{Vt}-V_0)+Q_f$ （409.42kN＜697.15kN）

4. 下压地基承载力计算

（1）基础底面处压力设计值的计算

$$Q_f=G_1+G_2+G_3=10.1+15.1+4.2=29.4\text{kN}$$

$$G_0=(2.6\times2.8\times2.5-0.42)\times17=302.3\text{kN}$$

$$G=Q_f+G_0=29.4+302.3=331.7\text{kN}$$

$$P=\frac{F+\gamma_G G}{A}=\frac{506.6+1.2\times331.7}{0.3\times2.5\times7}=172.3\text{kPa}$$

$$W_x=0.3\times2.5^2\times7/6=2.19\text{m}^3$$

$$W_y=2I_y/l_x=\frac{2}{2.8}\times[2.5\times0.3^3\times7/12+2\times0.3\times2.5\times(1.25^2+0.82^2+0.42^2)]=2.61\text{m}^3$$

$$\frac{M_x}{W_y}=\frac{65.8\times2.72}{2.61}=68.573\text{kPa}$$

$$\frac{M_y}{W_x}=\frac{46.6\times2.72}{2.19}=57.878\text{kPa}$$

$$P_{\min}=\frac{F+\gamma_G G}{A}-\frac{M_x}{W_y}-\frac{M_y}{W_x}$$
$$=172.3-68.573-57.878=45.849\text{kPa}>0$$

则

$$P_{\max}=\frac{F+\gamma_G G}{A}+\frac{M_x}{W_y}+\frac{M_y}{W_x}$$
$$=172.3+68.573+57.878=298.751\text{kPa}$$

（2）修正后的地基承载力特征值计算。

$$f_{ak}=300\text{kPa}$$

$$f_a=f_{ak}+\eta_b\gamma(b-3)+\eta_d\gamma_m(h-0.5)$$
$$=300+3.0\times17\times(3-3)+4.4\times17\times(2.72-0.5)$$
$$=300+0+166.1=466.1\text{kPa}$$

$$f_a/\gamma_{rf}=466.1/0.75=621.47\text{kPa}$$

$$1.2f_a/\gamma_{rf}=1.2\times466.1/0.75=745.76\text{kPa}$$

根据（1）、（2），易知

$P<f_a/\gamma_{rf}$ （172.3kPa＜621.47kPa）

$P_{\max}<1.2f_a/\gamma_{rf}$ （298.751kPa＜745.76kPa）

5. 板条计算

（1）边板内力。计算反力时应计入梁及支架的重力。

1）净土反力，由式（9-276）～式（9-279）计算：

$$\sigma_0=(F_v+G_f)/A=(506.6+14.3)/5.25=99.2\text{kN/m}^2$$

$$\sigma_{x1}=\sigma_x\times a_1/l_x=68.5\times1.25/1.40=61.2\text{kN}$$

$$\sigma_y=F_{H_y}h_t/W_x=46.6\times2.72/2.19=57.9\text{kN}$$

$$q_{x1}=(\sigma_0+\sigma_{x1})b_p=(99.2+61.2)\times0.3=48.1\text{kN/m}$$

$$q_y=\sigma_y b_p=57.9\times0.3=17.4\text{kN/m}$$

$$q_0=\sigma_0 b_p=99.2\times0.3=29.7\text{kN/m}$$

2）支座反力，按式（9-280）计算：

$$R_B=\left(q_{x1}+\frac{q_y l_y}{3l_2}\right)l_y/2$$
$$=\left(48.1+\frac{17.4\times2.5}{3\times1.54}\right)\times2.5/2=71.9\text{kN}$$

3）支座弯矩，按式（9-281）计算：

$$M_{\min}=-(l_y-l_2)^2[q_{x1}+(2+l_2/l_y)q_y/3]/8$$
$$=-(2.5-1.54)^2\times[48.1+(2+1.54/2.5)\times17.4/3]/8$$
$$=-7.29\text{kN}\cdot\text{m}$$

4）跨中弯矩，按式（9-282）计算：

$$M_{\max}=q_{x1}l_2^2[1-(l_y-l_2)2/l_2^2]/8$$
$$=48.1\times1.54^2[1-(2.5-1.54)^2/1.54^2]/8$$
$$=8.72\text{kN}\cdot\text{m}$$

5）支座切力，按式（9-283）计算：

$$Q_W=(l_y-l_2-b_h)\left[q_{x1}+q_y\left(1+\frac{l_2+b_h}{l_y}\right)/2\right]/2$$
$$=(2.5-1.54-0.31)\times$$
$$\left[48.1+17.4\times\left(1+\frac{1.54+0.31}{2.5}\right)/2\right]/2$$
$$=20.6\text{kN}$$

$$Q_N=(2.5-1.54+0.31)\times$$
$$\left[48.1+17.4\times\left(1+\frac{1.54-0.31}{2.5}\right)/2\right]/2-71.9$$
$$=-33.1\text{kN}$$

（2）强度计算。

1）一般受弯构件斜截面受剪承载力计算与否的判断：

$$\alpha_{cv}f_tbh_0=0.7\times1430\times0.3\times0.1=30.03<V=33.1\text{kN}$$

故斜截面受剪承载力需进行计算。

2）斜截面受剪承载力计算。当采用 4 肢 $\phi6$、HPB300 级钢箍筋，间距 $s=10\text{cm}$ 时，

$$V_{cs}=\alpha_{cv}f_tbh_0+f_{yv}A_{sv}h_0/s$$
$$=30.03+270\times28.3\times4\times10^{-3}\times0.1/0.1$$
$$=60.594\text{kN}>V=33.1\text{kN}$$

符合要求。

3）正截面强度，按式（9-298）计算：

$$x=\xi_bh_0=0.576\times0.1=0.0576$$

跨中截面上、下面所需的纵向受拉钢筋截面面积为

$$A_s=\frac{M}{(h_0-0.5x)f_y}=\frac{8.72}{(0.1-0.5\times0.0576)27.00}$$
$$=4.54\text{cm}^2$$

选 $2\phi14+2\phi12$，$A_s=1.54\times2+1.13\times2=5.34\text{cm}^2>4.54\text{cm}^2$。

支座截面上下面所需纵向受拉钢筋截面年面积为

$$A_s=\frac{7.29}{(0.1-0.5\times0.0576)27.00}=3.79\text{cm}^2$$

故选截面为 5.43cm^2 的 $2\phi14+2\phi12$ 钢筋符合要求。

4）所配置纵向受力钢筋在跨内均不切断和不弯起，故斜截面的抗弯强度可不验算。

6. 横梁计算

横梁荷载示意图如图 9-78 所示。

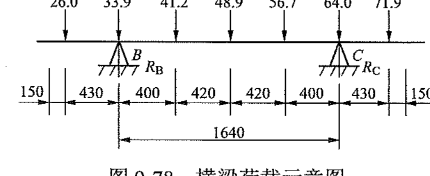


图 9-78 横梁荷载示意图

（1）荷载，按式（9-284）计算：

$$F_1=\frac{1}{2}(\sigma_0+\sigma_{xi})b_pl_y+\frac{1}{6}\sigma_yb_pl_y^2/l_2$$

$$F_1=\frac{1}{2}\times(99.2+68.5\times1.25/1.4)\times0.3\times2.5+$$
$$\frac{1}{6}\times57.9\times0.3\times2.5^2/1.54=71.9\text{kN}$$

$$F_2=\frac{1}{2}\times(99.2+68.5\times0.82/1.4)\times0.3\times2.5+$$
$$\frac{1}{6}\times57.9\times0.3\times2.5^2/1.54=64.0\text{kN}$$

$$F_3=\frac{1}{2}\times(99.2+68.5\times0.42/1.4)\times0.3\times2.5+$$
$$\frac{1}{6}\times57.9\times0.3\times2.5^2/1.54=56.7\text{kN}$$

$$F_4=\frac{1}{2}\times99.2\times0.3\times2.5+\frac{1}{6}\times57.9\times0.3\times2.5^2/1.54$$
$$=48.9\text{kN}$$

$$F_3'=\frac{1}{2}\times(99.2-68.5\times0.42/1.4)\times0.3\times2.5+$$
$$\frac{1}{6}\times57.9\times0.3\times2.5^2/1.54=41.2\text{kN}$$

$$F_2'=\frac{1}{2}\times(99.2-68.5\times0.82/1.4)\times0.3\times2.5+$$
$$\frac{1}{6}\times57.9\times0.3\times2.5^2/1.54=33.9\text{kN}$$

$$F_1'=\frac{1}{2}\times(99.2-68.5\times1.25/1.4)\times0.3\times2.5+$$
$$\frac{1}{6}\times57.9\times0.3\times2.5^2/1.54=26.0\text{kN}$$

（2）支座反力（BC 单根梁），按式（9-285）计算：

$$R_C=[(F_1-F_1')a_1+(F_2-F_2')a_2+(F_3-F_3')a_3+$$
$$(F_1+F_2+F_3+F_4+F_3'+F_2'+F_1')l_1/2]/(2l_1)$$
$$=[(71.9-26.0)\times1.25+(64.0-33.9)\times0.82+$$
$$(56.7-41.2)\times0.42+(71.9+64.0+56.7+$$
$$48.9+41.2+33.9+26.0)\times1.64/2]/(2\times1.64)$$
$$=112.65\text{kN}$$

$$R_B=(71.9+64.0+56.7+48.9+41.2+33.9+$$
$$26.0)/2-112.65=58.65\text{kN}$$

（3）支座剪力（单根梁），按式（9-286）计算：

支座外侧 $Q_W=F_1/2+F_2/4=71.9/2+64.0/4=52.0\text{kN}$

支座内侧 $Q_N=Q_W-R_C=52.0-112.7=-60.7\text{kN}$

（4）弯矩（单根梁），按式（9-288）、式（9-289）计算：

支座弯矩 $M_C=-F_1(a_1-l_1/2)/2=-71.9\times(1.25-1.64/2)/2=-15.5\text{kN}\cdot\text{m}$

跨中弯矩 $M_0=-(F_1a_1+F_2a_2+F_3a_3)/2+R_Cl_1/2$

$=-(71.9\times1.25+64.0\times0.82+56.7\times0.42)/2+112.7\times1.64/2$

$=9.3\text{kN}\cdot\text{m}$

（5）强度计算。

1）支座斜截面受剪承载力计算与否的判断：

$$\alpha_{cv}f_tbh_0=0.7\times1430\times0.15\times0.215=32.28<V=60.7\text{kN}$$

故斜截面受剪承载力需进行计算。

2）支座斜截面受剪承载力计算。当采用双肢 $\phi6$、HPB300 级钢箍筋，间距 $s=6.5$cm 时，

$$V_{cs}=\alpha_{cv}f_tbh_0+f_{yv}A_{sv}h_0/s$$
$$=32.28+270\times28.3\times2\times10^{-3}\times0.215/0.065$$
$$=82.83\text{kN}>V=60.7\text{kN}$$

支座两端 150mm 内用 $\phi6$ 双肢，$s=6.5$cm，符合要求，其他截面可按对应的剪力按公式（9-197）、式（9-198）计算，在此从略。

3）正截面强度。不计入纵向普通受压钢筋（$A_s'=0$），按单筋设计时，按式（9-164）～式（9-166）计算，则：

混凝土强度等级 C30，钢筋采用 HPB300，易知 $\xi_b=0.576$

对于跨中截面：

$$x=h_0-\sqrt{h_0^2-\frac{2M}{\alpha_1f_cb}}$$
$$=0.215-\sqrt{0.215^2-\frac{2\times9.3}{1.0\times14.3\times10^3\times0.15}}$$
$$=0.021<\xi_bh_0=0.576\times0.215=0.1238$$

跨中截面上、下面所需的纵向受拉钢筋截面面积为

$$A_s=\frac{M}{(h_0-0.5x)f_y}=\frac{9.3}{(0.215-0.5\times0.021)\times27.00}$$
$$=1.68\text{cm}^2$$

选 3ϕ14，$A_s=1.54\times3=4.62\text{cm}^2>1.68\text{cm}^2$，满足要求。

对于支座截面：

$$x=h_0-\sqrt{h_0^2-\frac{2M}{\alpha_1f_cb}}$$
$$=0.215-\sqrt{0.215^2-\frac{2\times15.5}{1.0\times14.3\times10^3\times0.15}}$$
$$=0.037<\xi_bh_0=0.576\times0.215=0.1238$$

支座截面上下面所需纵向受拉钢筋截面年面积为

$$A_s=\frac{15.5}{(0.215-0.5\times0.037)27.00}=2.92\text{cm}^2$$

选 3ϕ14，$A_s=1.54\times3=4.62\text{cm}^2>2.92\text{cm}^2$，满足要求。

此受弯构件一侧受拉钢筋的最小配筋率为 0.2% 和 $45f_t/f_y$ 的大值，即最小配筋率为 0.238%，构造最小配筋面积为

$$A_s=0.238/100\times0.25\times0.15\times10^4$$
$$=0.893\text{cm}^2<4.62\text{cm}^2$$

实配钢筋面积大于构造的最小配筋面积，则配筋方案满足要求。

4）所配置纵向受力钢筋在跨内均不切断和不弯起，故斜截面的抗弯强度可不验算。

7. 基柱支架计算

（1）单肢构件轴向力按式（9-275）计算：

基柱构件实长 $L=(2.35^2+0.8^2+0.77^2)^{\frac{1}{2}}=2.6\text{m}$

$$F_{V1}=\left(\frac{F_V}{4}+\frac{F_{Hx}L_0}{2l_1}+\frac{F_{Hy}L_0}{2l_2}\right)\frac{L}{L_0}$$
$$=\left(\frac{506.6}{4}+\frac{65.8\times2.35}{2\times1.64}+\frac{46.6\times2.35}{2\times1.54}\right)\times\frac{2.60}{2.35}$$
$$=231.6\text{kN}$$

（2）单肢构件强度按相关公式进行计算：

选 *Q345B* ∠90×8，$A_u=13.94\text{cm}^2$，故得

$$\sigma=231.6\times10^4/(13.94-2\times2.15\times0.8)$$
$$=220\,000<310\,000\times0.85=263\,500\text{kN/m}^2$$

单肢构件抗压强度满足计算要求。单肢构件受拉轴向力计算和抗拉强度计算从略。

8. 连接计算

连接计算包括：支架顶板厚度；地脚螺栓直径；支架与顶板连接的螺栓数量和十字板厚度；顶板与连接板焊缝长度；支座底脚部分的板厚、焊缝长度和连接螺栓；梁与底脚板连接的螺栓和局部承压计算等。应结合具体情况计算，本例从略。

六、电杆基础

（一）主要计算内容和计算公式

电杆基础的主要计算内容和计算公式已在本章第四节中进行了详细阐述。

（二）计算例题

1. 设计条件

（1）工程地质：一般黏性土，其物理特性为塑性指数 $I_p=13$、液性指数 $I_L=0.5$、孔隙比 $e=0.8$、容重 $\gamma=18\text{kN/m}^3$，无地下水，标准冻结深度 -2.0m。

（2）基础作用力：拉盘上拔力设计值 $F_T=48.5\text{kN}$；底盘下压力设计值 $F_V=167\text{kN}$；底盘上拔力设计值

$F_T' = 4\text{kN}$；反弯点处水平力设计值 $F_{H0} = 18.8\text{kN}$。

（3）材料：采用石材，极限抗弯强度 $f_{s0} = 7\text{MN/m}^2$，软化系数 $K_d = 0.75$。

（4）适用杆型：带叉梁等径拉线直线杆。

2. 基础型式和基本尺寸

石材底、拉、卡盘的布置型式见图 9-79。其基本尺寸：$h_0 = 2.65\text{m}$，$h = 3.0\text{m}$，$y_1 = 1.0\text{m}$，$y_2 = 2.85\text{m}$，等径水泥杆直径 $b = 0.4\text{m}$。

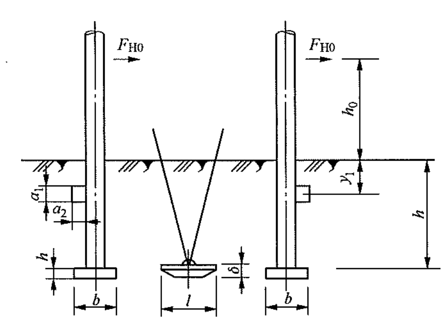


图 9-79 电杆基础组装图

3. 拉线盘设计

（1）计算参数：液性指数 $I_L = 0.5$ 的黏性土可定为可塑状态，按表 9-21 查得，计算上拔角 $\alpha = 20^\circ$，计算容重 $\gamma_0 = 16\text{kN/m}^3$。

（2）拉盘规格：取长度 $l = 1.2\text{m}$，宽度 $b' = 0.6\text{m}$，厚度 $\delta = 0.22\text{m}$。

（3）拉盘的上拔稳定。按式（9-23）计算：

由表 9-49 查得石材拉盘重力 $G_f = 450 \times 9.81 = 4410\text{N} = 4.41\text{kN}$，再由表 9-11 查得可塑状态黏性土的临界深度 $h_c = 2.0B = 2.0 \times 0.6 \times (1.2 + 0.6) = 2.16\text{m} < h_t$，按式（9-24）计算抗拔土体积如下：

拉线盘埋深 $h_t = 2.5\text{m}$；

拉线拉力与水平地面的夹角的正弦为 $\sin\omega = 0.924$；

拉线盘上平面与垂面的夹角 $w_1 = 90^\circ$；

$$V_t = h_c\left[bl\sin\omega_1 + (b\sin\omega_1 + l)h_c\tan\alpha + \frac{4}{3}h_c^2\tan^2\alpha\right] + bl(h_t - h_c)\sin\omega_1$$

$$= 1.8 \times \left[\begin{array}{l}0.6\times1.2\times1.0 + (0.6\times1.0+1.2)\times1.8\times \\ \tan 20^\circ + \frac{4}{3}\times1.8^2\times\tan^2 20^\circ\end{array}\right] + 0.6\times1.2\times(2.5-1.8)\times1.0$$

$$= 4.45 + 0.50 = 4.95\text{m}^3$$

则：$\gamma_f T\sin w = 1.1 \times 48.5 \times 0.924 = 49.3\text{kN} \leqslant V_t\gamma_s + G_f = 4.95 \times 16 + 4.41 = 83.6\text{kN}$

故拉线盘的上拔稳定满足要求。

（4）拉线盘弯矩按下式进行计算：

$$M_{1(\max)} = \left(\frac{1}{8}bl^2 - \frac{b^3}{24}\right)\frac{F_T}{bl}$$

$$= \left(\frac{1}{8}\times0.6\times1.2^2 - \frac{0.6^3}{24}\right)\times\frac{48.5}{0.6\times1.2}$$

$$= \frac{11}{96}\times1.2\times48.5 = 6.67\text{kN}\cdot\text{m}$$

（5）石材拉线盘受弯正截面承载力计算：

R_γ 取最小值 7MN/m^2，塑性发展系数 γ_1 取 1.0，石材计算截面弹性抵抗矩 $W_0 = \frac{1}{6}\times0.6\times0.22^2 = 4.84\times10^{-3}$，则

$$R_\gamma W_0\gamma_1 = 7000\times4.84\times10^{-3}\times1.0$$
$$= 33.9\text{kN}\cdot\text{m} \geqslant \gamma_{sc}M = 3.0\times6.67 = 20.01\text{kN}\cdot\text{m}$$

4. 卡盘设计

（1）计算参数：可塑状态黏性土，按表 9-41 查得计算容重 $\gamma_0 = 16\text{kN/m}^3$，计算内摩擦阻力角 $\beta = 30^\circ$，土压力系数 $m = 48\text{kN/m}^3$。

（2）电杆的极限倾覆力按式（9-56）计算：

由 $h/b = 3/0.4 = 7.5$，在表 9-42 中以插入法求得宽度增大系数 $K_0 = 1.87$，再由式（9-52）得计算宽度 $b_0 = bK_0 = 0.4\times1.87 = 0.748$，$\eta = F_{H_0}/h = 2.65/3 = 0.883$，在表 9-53 中，由插入法查得 $\theta = 0.7487$，则

$$\mu = \frac{3}{1-2\times0.7487^3} = 18.68$$

$$S_j = \frac{mb_0h^2}{\eta\mu} = \frac{48\times0.748\times3^2}{16.49} = 19.5 < \gamma_f S_0 = \gamma_f F_{H0}$$
$$= 1.1\times18.8 = 20.7\text{kN}$$

故应采取设置卡盘措施。

（3）配上卡盘：上卡盘的横向力按式（9-60）计算：

$$F_1 = \frac{3\gamma_f S_0}{mbh^2}\left(\frac{y_1}{h} + \eta\right) = 0.234$$

查表可得，配上卡盘时，$\theta = 0.7417$

$$P_k = \gamma_f S_0 - mb_0h_t^2\left(\theta^2 - \frac{1}{2}\right)$$

$$= 1.1\times18.8 - 48\times0.75\times3^2\times\left(0.7417^2 - \frac{1}{2}\right) = 4.53\text{kN}$$

上卡盘全长 L_u 按式（9-62）计算，取 $d_1 = 0.3\text{m}$，$d_2 = 0.2\text{m}$，则

$$L_u = \frac{P_k}{y_1\times(md_1 + 2\gamma d_2\tan\beta)} + b$$

$$= \frac{4.53}{1.0\times(48\times0.3 + 2\times16\times0.2\tan30^\circ)} + 0.4$$

$$= 0.25 + 0.4 = 0.65\text{m}\ （取 L_上 = 0.8\text{m}）$$

（4）弯矩按下式计算：取 $l_1 = 0.1\text{m}$ ，则

$$M_1 = \frac{1}{2} \times \frac{P_k}{L_{ch}} \times \left(\frac{L_{ch} - l_1}{2}\right)^2$$

$$= \frac{1}{2} \times \frac{4.53}{0.8} \times \left(\frac{0.8 - 0.1}{2}\right)^2 = 0.35\text{kN} \cdot \text{m}$$

（5）强度按式（9-203）计算：

$$R_\gamma W_0 \gamma_1 = 7000 \times \frac{1}{6} \times 0.3 \times 0.2^2 \times 1.0$$

$$= 14\text{kN} \cdot \text{m} \geqslant \gamma_{sc} M = 3.0 \times 0.35 = 1.05\text{kN} \cdot \text{m}$$

石材卡盘受弯正截面承载力满足要求。

5. 底盘设计

取宽度 $b = 1.0\text{m}$ ，厚度 $h = 0.22\text{m}$ 的正方形石材底盘。

（1）作用力：土重力为

$$G_0 = \left(1.0^2 \times 3.0 - \frac{\pi}{4} \times 0.4^2 \times 3.0 - 0.06 - 0.19\right) \times 16 =$$

38kN ，卡盘重力约 7.1kN ，底盘重力约 6kN ，电杆压力 167kN 。

（2）基础底面压力按式（9-26）计算：

$$P = \frac{F_V + G_f + G_0}{A} = \frac{167 + 7.1 + 6.0 + 38}{1.0^2} = 218.1\text{kPa}$$

（3）根据液性指数和孔隙比等资料，即 $I_P = 13$ ，$I_L = 0.5$ ， $e = 0.8$ ，查表可得未经修正的地基承载力特征值为 $f_{ak} = 220\text{kPa}$。按下式修正：

$$f_a = f_{ak} + \eta_b \gamma (b - 3) + \eta_d \gamma_m (d - 0.5)$$

$$= 220 + 0.3 \times (3 - 3) + 1.6 \times 18 \times (3.2 - 0.5)$$

$$= 297.76\text{kPa} > 218.1\text{kPa}$$

底盘下压承载力满足要求。

（4）强度计算。

1）底盘承受的弯矩按式（9-183）计算：

$$M = P_0 (b - b')^2 (2l + l') / 24$$

$$= 167 \times (1.0 - 0.4 \times 0.707)^2 (2 \times 1 + 0.4 \times 0.707) / 24$$

$$= 8.2\text{kN} \cdot \text{m}$$

2）强度按式（9-203）计算：

$$R_\gamma W_0 \gamma_1 = 7000 \times \frac{1}{6} \times 1.0 \times 0.22^2 \times 1.0$$

$$= 56.5\text{kN} \cdot \text{m} \geqslant \gamma_{sc} M$$

$$= 3.0 \times 8.2 = 24.6\text{kN} \cdot \text{m}$$

石材底盘受弯正截面承载力满足要求。

七、联合基础

（一）主要计算内容和计算公式

联合基础的主要计算内容和计算公式已在本章第三节中进行了详细阐述。

（二）计算例题

1. 设计条件

（1）工程地质：淤泥，孔隙比 $e = 1.5$ ，液性指数 $I_L = 1.1$ ；地下水位 −1.0m （波动范围 ±1.0m ）；淤泥的承载力特征值 $f_{ak} = 60\text{kN/m}^2$ ；$\gamma = 15\text{kN/m}^3$ ；$\varphi = 0$ ；$C = 10\text{kN/m}^2$ ；标准冻结深度 −1.4m 。

（2）基础作用力按四个塔腿分别给出（本例题只考虑 90° 大风工况的计算，其余工况类似）。

考虑 90° 大风工况为基础作用力的控制工况时（下压为负，上拔为正）：

A 腿 $H_{x3} = 11.9\text{kN}$ ； $H_{y2} = 4.8\text{kN}$ ； $T_A = 116\text{kN}$

B 腿 $H_{x4} = 11.9\text{kN}$ ； $H_{y0} = 4.8\text{kN}$ ； $T_B = 116\text{kN}$

C 腿 $H_{x1} = 13.1\text{kN}$ ； $H_{y1} = 5.7\text{kN}$ ； $N_C = -138\text{kN}$

D 腿 $H_{x2} = 13.1\text{kN}$ ； $H_{y2} = 5.7\text{kN}$ ； $N_D = -138\text{kN}$

（3）材料：混凝土强度等级采用 C25 ，钢筋采用 HRB400 级。

（4）适用塔型：直线塔， $\gamma_f = 1.1$ 。

2. 基础型式及基本数据

（1）型式：整体型，如图 9-80 所示。

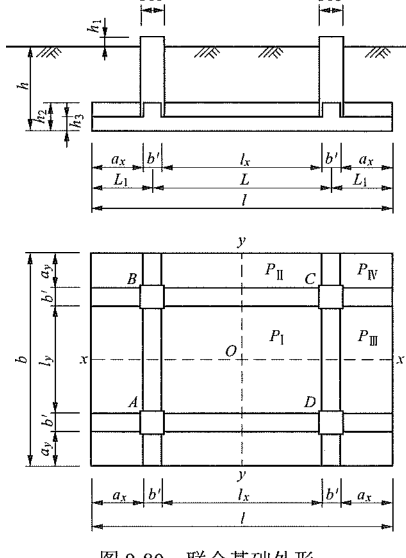


图 9-80　联合基础外形

（2）基本尺寸： $h = 1.8\text{m}$ ； $l = 6.4\text{m}$ ； $b = 4.6\text{m}$ ；$l_x = 3.404\text{m}$ ；$l_y = 2.304\text{m}$ ；$a_x = 1.098\text{m}$ ；$a_y = 0.748\text{m}$ ；$b' = 0.4\text{m}$ ； $h_3 = 0.3\text{m}$ ； $h_2 = 0.6\text{m}$ ； $L = 3.804\text{m}$ ；$h_1 = 0.2\text{m}$ 。

（3）基础体积和重力：

$$V_f = 6.4 \times 4.6 \times 0.3 + 6.4 \times 0.4 \times 0.3 \times 2 + 2 \times 0.4 \times 0.3 \times 4.6 + 0.5^2 \times 1.4 \times 4 + 0.05^2 \times 0.3 \times 4 \times 4 - 0.4^2 \times 0.3 \times 4 = 12.69\text{m}^3$$

$$\left.\begin{aligned}&\text{有水时重力} G_{f1} = 12.69 \times 14 = 177.7\text{kN}\\&\text{无水时重力} G_{f2} = 12.69 \times 24 = 304.6\text{kN}\end{aligned}\right\}$$

（4）底板正上方土的体积为

$$V_t = 6.4\times4.6\times1.8-12.69+0.5^2\times0.2\times4=40.5\text{m}^3$$

3. X 轴方向的倾覆稳定

（1）极限倾覆力矩 M_{xj} 由式（9-92）计算：

$$M_{xj}=(G_f+G_0)l/2=(177.7+40.5\times8)\times6.4/2$$
$$=1605\text{kN}\cdot\text{m}$$

（2）倾覆力矩 M_{xQ} 由式（9-93）计算：

$$\sum T_x = T_A + T_B = 116+116=232\text{kN}$$

$$\sum N_x = |(N_C+N_D)| = |(-138-138)| = 276\text{kN}$$

$$\sum H_x = 11.9+11.9+13.1+13.1=50\text{kN}$$

$$M_{xQ}=\gamma_f\left[\sum T_x(l+L)/2+\sum H_x(h+h_1)-\sum N_x(l-L)/2\right]$$
$$=1.1\times232\times(6.4+3.804)/2+1.1\times50\times(1.8+0.2)-1.1\times276\times(6.4-3.804)/2$$
$$=1017.9\text{kN}\cdot\text{m}$$

则 $M_{xj}=1605\text{kN}\cdot\text{m}\geqslant\gamma_f M_{xQ}=1017.9\text{kN}\cdot\text{m}$

即 X 轴方向的倾覆稳定满足要求。对于本例题，Y 轴方向的倾覆稳定不起控制作用且其计算与 X 轴方向的倾覆稳定类似，故省略其计算过程。

4. 下压稳定

（1）修正后的地基承载力特征值 f_a 按 GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》的有关规定计算，即

$$f_a = f_{ak}+\eta_b\gamma(b-3)+\eta_d\gamma_m(d-0.5)$$
$$=60+0+1.0\times5\times(1.8-0.5)=66.5\text{kN/m}^2$$

（2）地基压力和地基强度，取 90° 风向作用力计算，有

$$P=\frac{1.2\times(304.6+607.5)+138+138-116-116}{6.4\times4.6}$$
$$=38.7\text{kN/m}^2<66.5\text{kN/m}^2$$

$$M_x=(13.1+13.1+11.9+11.9)\times2+(116+116+138+138)\times3.804/2=1016.2\text{kN}\cdot\text{m}$$

$$M_y=(5.7+5.7+4.8+4.8)\times2+(138-116+116-138)\times3.804/2=42\text{kN}\cdot\text{m}$$

$$W_x=\frac{1}{6}\times6.4\times4.6^2=22.6\text{m}^3$$

$$W_y=\frac{1}{6}\times4.6\times6.4^2=31.4\text{m}^3$$

$$P_{max}=P+\frac{M_x}{W_y}+\frac{M_y}{W_x}=38.7+32.4+1.9$$
$$=73.0\text{kN/m}^2<1.2f_a=79.8\text{kN/m}^2$$

$$P_{min}=P-\frac{M_x}{W_y}-\frac{M_y}{W_x}=38.7-32.4-1.9=4.4\text{kN/m}^2$$

$P_{min}>0$，综上所述地基承载力计算满足要求。

5. 内力计算（按 90° 风计算，45° 风从略）

（1）梁板刚度比：根据混凝土设计规范，混凝土的泊松比，$\mu=0.2$，梁的抗扭刚度计算：

$h_2/b'=1.5$，查圣维南表，得 $K'=0.196$

$$GI_t=\frac{E_c}{2(1+\mu)}K'h_2b'^3$$
$$=\frac{28\times10^6}{2\times(1+0.2)}\times0.196\times0.6\times0.4^3$$
$$=87\,808\text{kN}\cdot\text{m}$$

板的刚度：

$$\frac{E_ct^3}{12\times(1-\mu^2)}=\frac{28\times10^6\times0.3^3}{12\times(1-0.2^2)}=65625\text{kN}\cdot\text{m}$$

当 $\frac{E_ct^3}{12\times(1-\mu^2)}/GI_t=65\,625/87\,808=0.75<1.0/\text{m}$，

根据板梁固着条件，P_1 板可按四边固定考虑。

（2）底板反力，按式（9-94）～式（9-96）计算。

$$\sigma_0=\frac{N_0}{bl}=[(12.69-6.4\times4.6\times0.3)\times24+2\times138-2\times116]/(6.4\times4.6)=4.64\text{kN/m}^2$$

$$\sigma_{x(max)}=\pm\frac{M_x}{W_y}=\pm\frac{6M_x}{bl^2}$$
$$=\pm(1016.2/31.4)=\pm32.4\text{kN/m}^2$$

$$\sigma_{y(max)}=\pm\frac{M_y}{W_x}=\pm1.86\text{kN/m}^2$$

（3）底板内力（见图 9-81）。

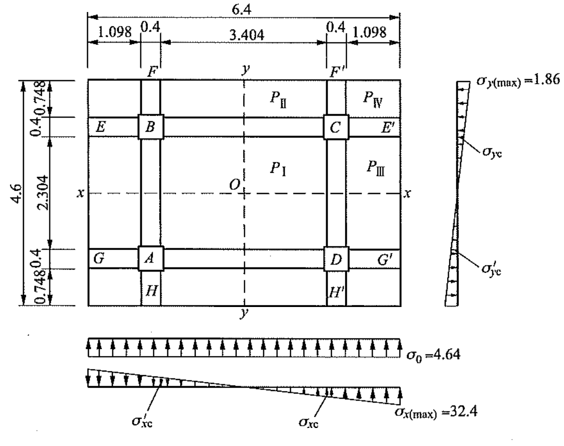


图 9-81 底板荷载示意图

1）P_1 板。由 $l_y/l_x=2.304/3.404=0.7$，从表 9-45 查得 $\eta_{0x}=0.016\,7$、$\eta_{0y}=0.034\,0$。再由式（9-97）计算跨中弯矩

$$M_{0x}=\eta_{0x}\sigma_0l_y^2=0.0167\times4.64\times2.304^2$$
$$=0.41(\text{kN}\cdot\text{m})/\text{m}$$

$$M_{0y}=\eta_{0y}\sigma_0 l_y^2=0.034\times4.64\times2.304^2$$
$$=0.84(\text{kN}\cdot\text{m})/\text{m}$$

据 $\sigma_{xc}=32.4\times1.702/3.2=17.23\text{kN/m}^2$，$\sigma_{yc}=1.86\times1.152/2.3=0.93\text{kN/m}^2$

轴心荷载系数 $\eta_x^0=0.0569$、$\eta_y^0=0.0735$，弯矩荷载系数 $\eta_x=0.0257$、$\eta_y=0.0166$，由式（9-98）计算固定端弯矩

$$M_x^0=-(\eta_x^0\sigma_0\pm\eta_x\sigma_{xc})l_y^2$$
$$=-(0.0569\times4.64\pm0.0257\times17.23)\times2.304^2$$
$$=^{-3.75}_{0.95}\ (\text{kN}\cdot\text{m})/\text{m}$$
$$M_y^0=-(\eta_y^0\sigma_0\pm\eta_y\sigma_{yc})l_y^2$$
$$=-(0.0735\times4.64\pm0.0166\times0.93)\times2.304^2$$
$$=^{-1.89}_{-1.73}\ (\text{kN}\cdot\text{m})/\text{m}$$

2）P_{II} 板。据 $l_x/a_y=3.404/0.748=4.6>2.0$，即按式（9-99）计算单位宽度的弯矩：

$$M_{P\text{II}}=-(2\sigma_0\pm\sigma_{y(\max)}\pm\sigma'_{yc})a_y^2/4$$
$$=-(2\times4.64\pm1.86\pm0.93)\times0.748^2/4$$
$$=^{-1.69}_{-0.91}\ (\text{kN}\cdot\text{m})/\text{m}$$

3）P_{III} 板。

据 $l_y/a_x=2.304/1.098=2.1>2.0$，按式（9-99）计算单位宽度的弯矩

$$M_{P\text{III}}=-(2\sigma_0\pm\sigma_{x(\max)}\pm\sigma'_{xc})a_x^2/4$$
$$=-(2\times4.64\pm32.4\pm17.23)\times1.098^2/4$$
$$=^{-17.76}_{+12.16}\ (\text{kN}\cdot\text{m})/\text{m}$$

（4）梁内力（见图 9-81）：

1）AD（BC）梁（板净跨与梁净跨之比等于 1.03 小于 1.1）：

AD 梁荷载计算

$$q_1=\frac{1}{2}(b-l_y)\left(\sigma_0+\frac{\sigma_{y(\max)}+\sigma_{yc}}{2}\right)$$
$$=\frac{1}{2}(4.6-2.304)\times\left(4.64+\frac{1.86+0.93}{2}\right)=6.93\text{kN/m}$$
$$q_2=\frac{1}{2}l_y(\sigma_0+\sigma_{yc}/2)$$
$$=\frac{1}{2}\times2.304\times(4.64+0.93/2)=5.88\text{kN/m}$$
$$q_3=\frac{1}{2}\sigma_{xc}(b-l_y)$$
$$=\frac{1}{2}\times17.23\times(4.6-2.304)=19.78\text{kN/m}$$
$$q_4=\frac{1}{4}\sigma_{xc}(l_x-l_y/2)l_y/l_x$$
$$=\frac{1}{4}\times17.23\times(3.404-2.304/2)\times2.304/3.404$$
$$=6.57\text{kN/m}$$

AD 梁内力由式（9-100）～式（9-115）计算

$$Q_{\text{A1}}=-Q_{\text{D1}}=-q_1l_x/2=-6.93\times3.404/2=-11.79\text{kN}$$
$$Q_{\text{A2}}=-Q_{\text{D2}}=-q_2(l_x-l_y/2)/2$$
$$=-5.88\times(3.404-2.304/2)/2=-6.62\text{kN}$$
$$Q_{\text{A3}}=Q_{\text{D3}}=-q_3l_x/5=-19.78\times3.404/5=-13.47\text{kN}$$
$$Q_{\text{A4}}=Q_{\text{D4}}=-q_4l_x/6=-6.57\times3.404/6=-3.73\text{kN}$$
$$\sum Q_{\text{AD}}=-11.79-6.62-13.47-3.73=-35.61\text{kN}$$
$$M_{\text{A1}}=M_{\text{D1}}=-q_1l_x^2/12=-6.93\times3.404^2/12$$
$$=-6.69\text{kN}\cdot\text{m}$$
$$M_{\text{A2}}=M_{\text{D2}}=-q_2\left(l_x^2-l_y^2/2+\frac{l_y^3}{8l_x}\right)/12$$
$$=-5.88\times\left(3.404^2-2.304^2/2+\frac{2.304^3}{8\times3.404}\right)/12$$
$$=-4.60\text{kN}\cdot\text{m}$$
$$M_{\text{A3}}=-M_{\text{D3}}=-q_3l_x^2/60=-19.78\times3.404^2/60$$
$$=-3.82\text{kN}\cdot\text{m}$$
$$M_{\text{A4}}=-M_{\text{D4}}=-q_4l_x^2/50=-6.57\times3.404^2/50$$
$$=-1.52\text{kN}\cdot\text{m}$$
$$\sum M_{\text{AD}}=-(6.69+4.60+3.82+1.52)=-16.63\text{kN}\cdot\text{m}$$
$$\sum M_{\text{DA}}=-(6.69+4.60-3.82-1.52)=-5.95\text{kN}\cdot\text{m}$$
$$M_{01}=q_1l_x^2/24=6.93\times3.404^2/24=3.35\text{kN}\cdot\text{m}$$
$$M_{02}=q_2\left(l_x^2-\frac{l_y^3}{4l_x}\right)/24=5.88\times\left(3.404^2-\frac{2.304^3}{4\times3.404}\right)/24$$
$$=2.62\text{kN}\cdot\text{m}$$
$$M_{03}=M_{04}=0$$
$$\sum M_0=3.35+2.62=5.97\text{kN}\cdot\text{m}$$

2）$AB(CD)$ 梁（板净跨与梁净跨之比等于 1.05＜1.1）。

AB 梁荷载

$$q'_1=(l-l_x)\left(\sigma_0+\frac{\sigma_{x(\max)}+\sigma_{xc}}{2}\right)/2$$
$$=(6.4-3.404)\left(4.64+\frac{32.4+17.23}{2}\right)/2=44.12\text{kN/m}$$
$$q'_2=l_y\left[\sigma_0+\sigma_{xc}\left(2-\frac{l_y}{l_x}\right)/2\right]/2$$
$$=2.304[4.64+17.23(2-2.304/3.404)/2]/2$$
$$=18.48\text{kN/m}$$
$$q'_3=\sigma_{yc}(l-l_x)/2=0.93(6.4-3.404)/2=1.39\text{kN/m}$$
$$q'_4=\sigma_{yc}l_y/8=0.93\times2.304/8=0.27\text{kN/m}$$

AB 梁内力按式（9-116）～式（9-131）计算：

$$Q'_{\text{B1}}=-Q_{\text{A1}}=q'_1l_y/2=44.12\times2.304/2=50.83\text{kN}$$

$Q'_{B2}=-Q_{A2}=q'_2 l_y/4=18.48\times 2.304/4=10.64\text{kN}$

$\sum Q'_B=-\sum Q_A=50.83+10.64=61.47\text{kN}$

$M'_{B1}=M'_{A1}=q'_1 l_y^2/12=44.12\times 2.304^2/12$
$=19.52\text{kN}\cdot\text{m}$

$M'_{B2}=M'_{A2}=5q'_2 l_y^2/96=5\times 18.48\times 2.304^2/96$
$=5.11\text{kN}\cdot\text{m}$

$\sum M'_B=-\sum M'_A=19.52+5.11=24.63\text{kN}\cdot\text{m}$

$M'_{01}=-q'_1 l'^2{}_y/24=-44.12\times 2.304^2/24=-9.76\text{kN}\cdot\text{m}$

$M'_{02}=q'_2 l_y^2/32=18.48\times 2.304^2/32=3.07\text{kN}\cdot\text{m}$

$\sum M'_0=-9.76+3.07=-6.69\text{kN}\cdot\text{m}$

6. 强度计算

（1）底板正截面。

1）P_{I}板：

$$M_{0x}=0.41(\text{kN}\cdot\text{m})/\text{m}$$
$$M_{0y}=0.84(\text{kN}\cdot\text{m})/\text{m}$$
$$M_x^0=^{+0.95}_{-3.75}(\text{kN}\cdot\text{m})/\text{m}$$
$$M_y^0=-1.89(\text{kN}\cdot\text{m})/\text{m}$$

板上部 X 和 Y 向沿每米所需纵向钢筋截面积 A_{sx}、A_{sy} 按简化公式计算，即

$$A_{sx}=\frac{M_x^0}{0.9f_y h_0}=\frac{0.95\times 10^6}{0.9\times 360\times 250}=12\text{mm}^2$$
$$A_{sy}=\frac{M_{0y}}{0.9f_y h_0}=\frac{0.84\times 10^6}{0.9\times 360\times 250}=11\text{mm}^2$$

板下部 X 和 Y 向沿每米所需纵向钢筋截面积为

$$A_{sx}=\frac{M_x^0}{0.9f_y h_0}=\frac{3.75\times 10^6}{0.9\times 360\times 250}=47\text{mm}^2$$
$$A_{sy}=\frac{M_y^0}{0.9f_y h_0}=\frac{1.89\times 10^6}{0.9\times 360\times 250}=24\text{mm}^2$$

按最小配筋率 $A_s=1.0\times 0.25\times 0.1\%=2.5\text{cm}^2$

2）P_{II}板：

$$MP_{\text{II}}=-1.69(\text{kN}\cdot\text{m})/\text{m}$$

板下部 Y 向沿每米所需纵向钢筋截面积为

$$A_{sy}=\frac{M_y^0}{0.9f_y h_0}=\frac{1.69\times 10^6}{0.9\times 360\times 250}=21\text{mm}^2$$

3）P_{III}板：

$M_{p\text{III}}=12.16$ 及 $M_{p\text{III}}=-17.76$，由此得

板上部 $A_{sx}=\dfrac{12.16\times 10^6}{0.9\times 360\times 250}=151\text{mm}^2$

板下部 $A_{sx}=\dfrac{17.76\times 10^6}{0.9\times 360\times 250}=220\text{mm}^2$

（2）梁的强度（各梁截面尺寸均取 0.4m×0.6m）。梁的斜截面受剪承载力和正截面受弯承载力应按照梁的内力计算结果依据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》进行配筋计算，本例从略。

（3）基柱的正截面和斜截面配筋计算与普通钢筋混凝土基础主柱的计算相同。本例从略。

（4）底板的抗冲切验算和抗剪切验算与普通钢筋混凝土基础底板的计算相同。本例从略。

第七节　特殊地质条件下的地基处理和基础设计

本节主要介绍了河槽河滩、地基土的地震液化、盐渍土、湿陷性黄土、冻土、风积沙沙漠地区、采动影响区等特殊地质条件下输电线路基础的地基处理及基础设计。

一、河槽河滩

（一）基础型式及适用条件

1. 基础型式

跨河基础的型式应根据塔型、荷载、工程地质、水文、地震时土层液化深度、施工可能性及技术经济综合比较进行选择。按基础的埋置深度可分为浅埋基础和深埋基础两类。

（1）常用的浅埋基础型式有直柱混凝土台阶式基础、直柱或斜柱钢筋混凝土板式基础、装配式基础和联合式基础等。

（2）常用的深埋基础多为钻孔灌注桩基础，PHC 管桩等，其型式有单桩、群桩、高桩、低桩承台和高桩框架式基础。

2. 适用条件

（1）浅埋基础：适用于岩层较浅，不能设计桩基的塔位。

1）基坑在施工期间不产生流砂或突涌现象。

2）设计洪水期间基础顶面无漂浮物和基础冲刷较浅的塔位。

3）塔位处无冰排撞击。

4）地震的基本烈度为 7 度及其以上地区，塔基的土质不为液化可能性的土、冲积土以及其他松软的人工填土等。

（2）深埋基础。

1）受漂浮物及冰排撞击和受洪水冲刷的塔位，承台底面宜埋于冻胀土标准冻结深度以下。

2）当设计洪水位高于塔位的设计地面时，高桩承台和框架式基础横梁的标高应能使漂浮物自由通过，承台的迎水面宜做成流线形，桩的截面宜为圆形。

3）地震的基本烈度为 7 度及其以上地区，桩的持力层应为非液化可能性的土，当摩擦桩周围土为液化

可能性土时，可以采取加大其相对密度或其他处理方法，以达到非液化土条件的措施。

（二）基础设计的主要原始资料

1. 水文地质

（1）在水中立塔的塔位，基础设计时应计算洪水冲刷、流水动压力、漂浮物撞击、冻融期的拥冰堆积等作用，必要时可采取防护措施。

（2）线路跨越河流断面上、下游影响区段内的河岸坍塌、河湾、边滩和沙洲的移动、河槽分流、深槽浅滩等河床演变情况和发生时间，以及洪水的天然冲刷深度和一般冲刷深度。如系通航河流，则应明确航道的变迁情况。

（3）线路跨越水库断面结冰期的水位及冰厚，在水库坝下跨越时，须有水库的设计标准、坝下水位、冲刷以及对塔位的影响。

（4）设计和常年洪水期间漂浮物的种类、大小、密度、水的相应流速、塔位处流速以及河中现有建筑物的破坏情况。

（5）流冰荷载的设计标准与洪水相同，取 30 年、50 年或 100 年一遇的流冰冰厚、冰块大小、方向、水面的密度及冰坝形成情况，流冰期间的最高流冰和初融流冰水位及其相应的流速。

2. 工程地质

（1）跨河基础均应逐基钻探。对土质地基，勘探孔深度应能控制地基主要持力层，并同时满足抗压和抗拔的验算要求，一般性勘探点深度不宜小于基础底面宽度的 1.5 倍，且不应小于 10m；控制性勘探点深度不宜小于基础底面宽度的 3.0 倍，且不应小于 15m。

（2）塔基的地下水位标高和变动幅度以及地下水对基础材料的侵蚀性。

（3）应调查了解地层岩性、颗粒组成及基岩埋藏深度等情况。

（4）地基土的容许承载力。

（5）地面下存在饱和砂土和饱和粉土时，对位于地震烈度 7 度及以上地区的塔位，应进行液化判别。

3. 塔基的冲刷计算

塔基的冲刷计算分河床自然演变冲刷、一般冲刷和局部冲刷三种。目前，输电线路设计中仅考虑一般冲刷和局部冲刷的影响。现引用的冲刷计算公式，系根据公路及铁道部门用于桥梁建筑方面的资料。采用该公式计算时，必须进行现场调查，结合河道具体情况，经过计算再确定冲刷数据。

（1）河床自然演变冲刷。在天然条件下河床的自然演变引起的冲刷称为自然演变冲刷。自然演变冲刷一般可分为以下几种情况：

1）在河流发育成长过程中，河床纵断面的变形，如河流上游标高逐渐降低和河流下游的标高逐渐增高等。这类变形一般时间较长，变化缓慢。

2）河流横向移动引起的变形。如边滩下移，河湾的发展、移动和天然截直等所引起的河流变形。这种变形较快，变形的幅度也较大。

3）河段最大深泓线不规则摆动而形成的冲刷变形，通常称为集中冲刷。河床愈不稳定，这种变形愈明显而且愈严重。

4）河流随水位、流量变化而发生的周期性冲淤变形。

5）工农业建设及河道整治等对河道引起的变形，如水库下游的清水冲刷，流域内的水土保持引起的河道下切等。

以上的河道变形，应根据具体河道的历史发展情况和类似河流的实际观测资料，并结合河道的规划做出适当的估算。

（2）一般冲刷。河槽的一般冲刷是指水流受压缩后，有效过水断面减少和流速增大而引起在河床过水断面上发生的冲刷，这种冲刷不同程度地分布在整个断面上。

在构筑物跨下河滩冲刷的特点，是河滩的流速大于该处土的容许不冲刷流速时，冲刷即开始，冲刷增大则流速相应减少，直至流速小于容许不冲刷流速时，冲刷即停止。

输电线路设置在河滩跨度内杆塔基础的冲刷计算，首先需判断塔位处的河滩能否变成河槽，或河槽能否扩宽和摆动而影响到塔位。对位于可能变成河槽的河滩内的塔位，应按河槽冲刷设计杆塔基础，其余的河滩内的塔位应按河滩冲刷后的情况进行设计。

1）河槽的一般冲刷计算，常用的一般冲刷计算公式，可采用 1964 年全国桥渡冲刷计算学术会议推荐的 64-1、64-2 计算式。在此基础上，最新的 JTG C30—2015《公路工程水文勘测设计规范》推荐采用 64-1 修正式和 64-2 简化式。

a）河槽一般冲刷计算的 64-1 修正式：

$$\left.\begin{aligned} h_{\mathrm{p}} &= \left[\frac{A\dfrac{Q_{\mathrm{p}}}{\mu L}\left(\dfrac{h_{\max}}{h}\right)^{5/3}}{Ed_{\mathrm{av}}^{1/6}}\right]^{3/5} \\ d_{\mathrm{av}} &= \frac{\sum_1^n P_i d_i}{100} \end{aligned}\right\} \tag{9-300}$$

式中 Q_p——设计流量，m³/s；

L——跨间的长度，m；

h——设计断面跨距间的平均水深，m；

h_{max}——设计断面跨距间的最大水深，m；

d_{av}——河床土的平均粒径，mm；

d_i——i 粒径土的直径，mm；

P_i——i 粒径土的百分率；

E——与汛期含砂量有关的参数，可按表 9-86 取值；

μ ——因桩基侧面涡流区阻水而引起的过水面积折减系数，称为压缩系数，$\mu=1-0.375v_p/L_0$，也可按表 9-87 取值；

v_p ——设计流速，m/s，一般采用河槽（主槽和边滩）的天然平均流速；

L_0 ——跨间的净距，m；

A ——单位宽度流量集中系数，$A=(\sqrt{B}/H)^{0.15}$；

B ——河槽宽度，m；

H ——满槽水位时的河槽平均水深，m。

表 9-86 系 数 E

含砂量 ρ（N/m³）	＜10	10～100	＞100
E	0.46	0.66	0.86

注 含砂量 ρ 采用历年汛期月最大含砂量平均值。

b）河槽一般冲刷计算的 64-2 简化式：

$$h_p=1.04\times\left(A\frac{Q_2}{Q_c}\right)^{0.90}\times\left[\frac{B_1}{\mu(1-\lambda)B_2}\right]^{0.66}\times h_{max} \tag{9-301}$$

式中 Q_c ——天然状态下河槽部分设计流量，m³/s；

Q_2 ——基础建成后断面上河槽的流量，m³/s，按表 9-88 取值；

B_1 ——设计断面上的河槽宽度，m；

B_2 ——跨越档断面上的河槽宽度，m，按表 9-88 取值；

λ ——全部基础所占过水面积与跨距间全部过水面积之比。

表 9-87 压 缩 系 数 μ

设计流速 v_p（m/s）	净跨径 L_0（m）								
	≤10	13	16	20	25	30	35	40	45
＜1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.0	0.96	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
1.5	0.96	0.96	0.97	0.97	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99
2.0	0.93	0.94	0.95	0.97	0.97	0.98	0.98	0.98	0.98
2.5	0.90	0.93	0.94	0.96	0.96	0.97	0.97	0.98	0.98
3.0	0.89	0.91	0.93	0.95	0.96	0.96	0.97	0.97	0.98
3.5	0.87	0.90	0.92	0.94	0.95	0.96	0.96	0.97	0.97
≥4.0	0.85	0.88	0.91	0.93	0.94	0.95	0.96	0.96	0.97

注 本表摘自 JTG C30—2015《公路工程水文勘测设计规范》中表 8.3.1-1。

Q_1 和 Q_2 都是参与搬运推移质的流量（在河滩上没有推移质运动），基本上是和河槽宽度相对应的，可以通过查勘先确定 B_1 和 B_2，再按流量分配方法求 Q_1 和 Q_2。如按河流类型和基础压缩水流情况考虑时，则可按表 9-88 取值。

表 9-88 B_2 及 Q_2 采 用 值

河型	跨 矩	B_2 的采用值	Q_2 的采用值	简图
平原区	河滩全压缩河槽全跨 $B_2=B_1=L$	L	Q_s	
	仅跨河槽的一部分 $B_2=L<B_1$	L	Q_s	
	仅河滩压缩一部分，但河槽不扩宽 $B_2=B_1<L$	B_1	$Q_1+Q_4\dfrac{Q_1}{Q_1+Q_3}$	
	仅河滩压缩一部分，但河槽扩宽至河堤 $B_2=L>B_1$	L	Q_s	

续表

河型	跨　矩	B_2的采用值	Q_2的采用值	简图
山前区	跨河槽的一部分，此时B_1应采用河槽的有效宽B_0	L	Q_s	L $B_1=B_0$
山区	无河滩且不压缩，河槽$B_1=L$	L	Q_s	$L=B_1$
	有阶地且阶地压缩一部分	同平原区		

注　1. 表中$L=(1-\lambda)B_2$；

2. Q_2栏中Q_s为设计流量。

2）河滩的一般冲刷计算。

河滩的一般冲刷后的水深h_p为

$$h_p=q/v_b \tag{9-302}$$

式中　q——河滩设置杆塔基础后的单位宽度的流量，$m^3/(s\cdot m)$；

v_b——河滩土的容许不冲刷流速，m/s。

（3）局部冲刷。由于基础设置而阻碍了水流，被阻水流在基础周围以强烈的涡流形式与地面的泥沙发生作用。因此，在基础周围，特别是迎水面附近产生冲刷坑，使基础自身结构发生变化，夹沙能力也随着冲刷坑的加深和加大而减小。

塔基的局部冲刷可采用最新的 JTG C30—2015《公路工程水文勘测设计规范》推荐的65-1修正式和65-2公式计算。

1）对于非黏性土河床。

65-1修正式：

当$v\leqslant v_0$时，$$h_b=K_\xi K_{\eta 1}b_1^{0.6}(v-v_0') \tag{9-303}$$

当$v>v_0$时，$$h_b=K_\xi K_{\eta 1}b_1^{0.6}(v-v_0')\left(\frac{v-v_0'}{v_0-v_0'}\right)^{n_1} \tag{9-304}$$

$$v_0=0.0246\left(\frac{h}{d_{av}}\right)^{0.14}\left(332d_{av}+\frac{10+h}{d_{av}^{0.72}}\right)^{1/2} \tag{9-305}$$

式中　h_b——局部冲刷深度，m；

K_ξ——墩型系数，矩形取1.24，圆形取0.85，其他型取1.2；

b_1——基桩的计算宽度，取迎水面宽度，当水流与迎水面有偏角时，可按偏角进行折算，m；

$K_{\eta 1}$——随冲刷线以上土的平均粒径d_p变化的系数，$K_{\eta 1}=0.8\left(\frac{1}{d_{av}^{0.45}}+\frac{1}{d_{av}^{0.15}}\right)$，也可按图9-82取值；

d_{av}——河床土的平均粒径，适用范围0.1～500mm；

v——一般冲刷后的垂线平均流速，适用范围为0.1～6m/s；

v_0——土颗粒受冲刷时的起动流速，m/s；

h——采用一般冲刷后的水深，适用范围为0.2～30m；

v_0'——基础周围土颗粒的起冲流速，m/s；

$$v_0'=0.462\left(\frac{d_{av}}{b_1}\right)^{0.06}v_0$$

n_1——与v、v_0、d_p有关的系数；

$$n_1=\left(\frac{v_0}{v}\right)^{0.25d_{av}^{0.19}}$$

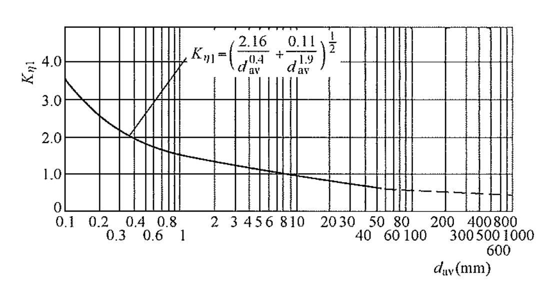


图9-82　$K_{\eta 1}$值曲线

65-2计算式：

当$v\leqslant v_0$时，$$h_b=K_\xi K_{\eta 2}b_1^{0.6}h^{0.15}\left(\frac{v-v_0'}{v_0}\right) \tag{9-306}$$

当$v>v_0$时，$$h_b=K_\xi K_{\eta 2}b_1^{0.6}h^{0.15}\left(\frac{v-v_0'}{v_0}\right)^{n_2} \tag{9-307}$$

式中　h——一般冲刷后的水深，m，对输电线路基础冲刷计算可取冲刷前的水深；

$K_{\eta 2}$——随冲刷线以上土平均粒径d_p变化的系数，

$$K_{\eta 2}=\frac{0.0023}{d_{av}^{2.2}}+0.375d_{av}^{0.24}；$$

n_2——与v、v_0、d_p有关的系数，$n_2=\left(\frac{v_0}{v}\right)^{0.23+0.19\lg d_{av}}$；

v_0——土颗粒受冲刷时的起动流速（m/s），$v_0 = 0.28(d_{av}+0.7)^{0.5}$；

v_0'——基础周围土颗粒的起冲流速，m/s，$v_0' = 0.12(d_{av}+0.5)^{0.55}$；

v、K_ξ——符号含义与式（9-304），式（9-305）相同。

2）对于黏性土河床：

当 $h_p/B_1 \geqslant 2.5$ 时，

$$h_b = 0.83K_\xi B_1^{0.6} I_L^{1.25} v \tag{9-308}$$

当 $h_p/B_1 < 2.5$ 时，

$$h_b = 0.55K_\xi B_1^{0.6} h_p^{0.1} I_L^{1.0} v \tag{9-309}$$

式中 I_L——冲刷坑范围内黏性土液性指数，适用范围为0.16～1.48。

（三）塔位的选定原则

（1）从地貌条件考虑：塔位宜置于地形平缓、河流顺直区段；位于冲刷岸则应远离冲刷岸边。

（2）从水文地质条件考虑：

1）跨越塔位一般宜设置在常年洪水位淹没范围以外；

2）基础设计应考虑 30～100 年河岸冲刷和变迁的影响；

3）尽量避免在冰厚大于 0.5m 的水库区内立塔；

4）塔位宜位于 30 年一遇流冰水位之外，当塔位受到高于 30 年一遇流冰水位影响时应按式（9-310）验算撞击影响。

$$P = mV/t \tag{9-310}$$

式中 m——漂流物的质量，N；

V——水流速度，m/s；

t——撞击时间。当无具体资料时，可取 1s。

（3）从地震条件考虑：塔位应尽量避开饱和松散砂土或饱和粉土构成的地基以及古河道、断层破碎地带等；宜置于较厚的黏土层或粉质黏土层中。

二、地基土的地震液化

（一）杆塔基础考虑地震液化的条件

对位于地震烈度为 7 度及以上地区的高杆塔基础及特殊重要的杆塔基础、8 度及以上地区的 220kV 及以上耐张型杆塔的基础，当场地为饱和砂土或饱和粉土时，均应考虑地基液化的可能性，并采取必要的稳定地基或基础的抗震措施。

（二）液化场地处理措施

加大土体前期的抵抗液化能力和控制液化后土体过大的变形破坏是工程上对液化地基处理的两种思路。因此能使颗粒胶结固化增加黏聚力，加大砂性土密实度，限制地震时土中孔压上升的方法均可用来抵抗液化及液化后大位移的发生。

在理论上处理思路主要有两种：一是改良液化土体的性质，包括挖除换填、提高密实度、降低含水率等方法；二是改善液化时的土体内应力应变条件，包括提高有效应力、消散孔隙水应力、阻止孔压的发展、抑制剪切变形等。

1. 土质改良法及机理分析

（1）挖除置换。挖除置换就是将可液化土层挖去并用非液化土层置换，这样不仅挖去了上部的易液化土层，而且性质较好的回填土还有利于防止下部砂层的液化破坏。一般当易液化层埋深较浅、厚度不大时可考虑全部挖去，当易液化层埋深较深或厚度较大时，该法就失去了使用意义。

液化后的大变形流动破坏是易液化地基破坏的主要形式，而且会造成地基中结构物的变形破坏。在动荷载作用下，对于具有较低剪切模量和较高黏滞系数的地基会在短的时间内液化达到大变形流动状态，因此可以通过置换的方式将黏滞系数大剪切模量低的地基土换成黏滞系数小剪切模量高的地基土，从而减小液化后流动带来的破坏。

（2）密实。密实化是广泛采用且行之有效的一种处理可液化砂层的方法，该法通过增加砂土的相对密实度，降低其液化势。数值分析结果以及离心机模型试验表明设置密实层对于地基抗液化性能的提高是有很大帮助的，振密上覆层能够抵抗液化、减少由于地震作用引起的沉降，但是存在最佳振密厚度，密实层并不是越厚越好。密实法处理易液化地基表层，除了延缓和阻止液化的发生，还可以减缓地基中结构物的动力响应。

从实践上来看，利用隶属于密实法的爆破振密、强夯、振冲挤密碎石桩法处理可液化砂土地基均取得了成功，但是对于以细颗粒为主的土层，这些方法就不是十分有效了，因为细颗粒土渗透系数较小、排水通道不畅导致孔隙难以压缩。

（3）围封。发生液化的砂性土地基，在上部基础局部荷载作用下，产生竖向沉降变形的同时，还伴随产生大量的侧向挤出变形。围封措施可以加强对临空面、临坡面土体的有效约束。采用适当的围封措施是阻止易液化地基产生液化流动、减少侧向变形的有效且经济的方法。

常用的围封方法有钢板桩、深搅桩、碎石桩、地下连续墙、截断墙等。用隔断结构将结构物基础连同附近的地基从四周包围起来，避免过大侧向位移导致建筑物破坏。但是围封措施不能阻止地基土的液化，因此围封法如果与其他方法配合使用则效果更好，如围封注浆法、深搅桩配合加筋法等。使用围封处理措施时，隔断结构必须有足够的深度，应当穿越可液化

砂层，否则围封措施将起不到应有的作用。如果在采用围封措施的同时再设置一些砾石、砂土的竖向排水桩，则可以提高抗液化能力和液化后抗侧向变形的能力。

（4）灌浆拌和。灌浆拌和法是指利用液压、气压或电化学原理，通过注浆管把浆液（水泥浆、水泥砂浆、化学浆材等）均匀地注入地层中（拌和法则是利用机械作用将浆液和土体在原位进行搅拌混合），浆液以填充、渗透和挤密等作用形式赶走土颗粒间和裂隙中的水分和空气，并占据其原先位置，经过人工养护一段时间后，浆液将原来松散土粒和裂隙胶结成一个整体，形成一个强度大防水性能好的结合体，从而加固地基、抵抗液化、减缓液化区扩展产生的侧向作用力对结构物造成的破坏，大大提高了地基及其结构物抵抗液化变形的能力。用压力灌浆加固地基的一个重要环节就是在设计时要在被加固的范围边缘做好封闭措施，使得浆液对被加固区域充分填充，最好的办法就是与围封法联合使用，利用围封法形成止水帷幕。拌和法中运用较多的是高压喷射注浆法和深层搅拌法两种。

2. 改变土体液化时应力条件及机理分析

（1）增压。增压法实质上是通过改变易液化土体的应力条件来达到抵抗液化的目的，利用土体存在上覆压力时不易液化的特点，在易液化地基表面覆盖一层由非液化土组成的压重层，提高土体的有效应力，从而增强地基的抗液化能力。压重盖层的厚度应进行设计，不是压重越厚越好，但如果压重盖层的厚度过厚，在土体中将产生较大的初始剪应力，液化地基中存在过大的初始剪应力较易触发流滑。目前属于压重法范畴并且采用较多的是地面堆载、超载法，常常联合砂井、砂石桩、塑料排水板等竖向排水设施来进行增压排水抗液化处理。

（2）排水。排水法的目的主要是降低砂土地基的饱和度或者是限制地震液化时土体内的超孔隙水应力累积增加，可以有效地减小液化的可能性，尤其对于不透水层中的饱和砂性土夹层的地质情况特别适合。目前，采用较多的排水方法是砂砾井排水法，砾石的渗透系数一般比砂性土大两个数量级以上，排水效果很好，这使得地震时产生的超孔隙水应力迅速消散，从而抑制液化的发生。在实际工程中井点排水法已经很少单独采用，很多情况下作为其他方法的排水辅助系统，如很多液化地基的处理中利用塑料排水板作为竖向排水系统配合振动碾压，辅助性地达到加固易液化地基的目的。当存在黏土或粉细土不透水层时，排水时在不透水层上会产生一层水膜，阻止了孔隙水的排出，如果这时碎石桩未打穿该层或被淤塞了，抗液化的效果就非常差，在动力作用下无法释放的超孔隙水应力就会冲破不透水层，发生涌砂或砂沸。因此要保证抗液化效果就必须打穿易液化层和地面之间的所有低渗透层，而且要保证竖向排水通道的通畅。

（3）加筋。加筋加固法是在土中加入筋带、钢筋、纤维、网状材料等加筋材料形成地基土与加筋材料的复合体，借助筋材的抗拉强度来加强土体的稳定性。

水平加筋材料与地基的相互作用，主要有两种效应：①侧向约束力效应，通过加筋材料与地基的接触摩擦，增强了侧向抗拉能力，改变了浅层土的应力和变形状态，提高了浅层土的抗剪强度。②网兜效应，由于地基的变形使得加筋材料产生了对地基中部的抬升力，使得地基应力分布趋于均匀，减轻基础附近的应力集中，从而在基底下不会形成应力集中区，有利于防止塑性区的展开，限制地基土的不均匀沉降。在易液化地基中设置碎石桩、砂土桩、塑料排水板等竖向排水体和柔性止水系统，抗剪能力较差，加上有时候地基本身土性就比较软弱，所以处理过后的地基在液化时仍有比较大的侧向位移和竖向沉降，这时可以在上述地基中设置土工织物，加强土的抗剪能力，减少变形量，在处理易液化地基时可以同时采用几种处理方法，互相弥补不足。

（4）桩基础。桩基础是处理易液化地基时有效、相对比较昂贵的手段，在可液化土层中采用桩基时，桩应穿过可液化土层，并有足够的长度伸入稳定的土层中。实际震害资料表明，穿透液化层的桩基础是一种有效的抗震措施，抵抗液化后地基土承载力降低甚至消失后结构物基础的变形破坏，但前提是桩长必须足够，并且不以液化土层作为持力层。

三、盐渍土

我国西北地区分布着大量盐渍土地质，输电线路工程路径不可避免需要穿越盐渍土地区，盐渍土对输电线路的影响主要在于其腐蚀性。由于输电线路铁塔的基础为钢筋混凝土材料，在盐渍土地区，盐溶液通过混凝土材料的孔隙或毛细作用的渗透浸入混凝土。当温度升高时，盐溶液中的水分蒸发，盐分析出结晶，体积增大，使混凝土材料中产生巨大的内应力。超过混凝土材料的抗拉强度造成混凝土开裂破坏。而混凝土的开裂，又给盐溶液的浸入开辟了通道，加速了混凝土的破坏。另外，盐溶液浸入混凝土后，有害离子使钢筋产生化学腐蚀及电化学腐蚀。由于铁锈体积增大，亦使混凝土内应力增加，所以产生顺主钢筋方向的纵向裂纹，从而使结构得到破坏。

（一）盐渍土地区地基处理

盐渍土地区输电线路在路径选择时应充分考虑腐蚀性对全线塔基施工以及后期维护的影响，在不影响

全局的情况下适当调整路径，尽量避让强、中等腐蚀地区，尤其是不利于防腐处理的地区。

现行 DL/T 5219—2014《架空输电线路基础设计技术规定》中附录 B.2 的条文说明中指出，盐渍土地区杆塔地基处理原则是参考《盐渍土地区建筑规范》结合输电线路杆塔基础特性而制定的。在有腐蚀地区要在水和土质中取样化验 pH 值，Cl^-，SO_4^{2-} 的含量，以此确定腐蚀等级，分别采取一、二、三级防腐措施，并可参照现行 SY/T 0317—2012《盐渍土地区建筑规范》的要求实施。

盐渍土地区输电线路杆塔地基处理的一般原则如下：

（1）盐渍土地基上的杆塔基础应根据其类别和承受不均匀沉降的能力，地基的溶陷等级以及浸水的可能性设计上应采取相应的预防措施：

1）防水措施。做好杆塔基面排水、远离水渠、地下管沟、集水井等。

2）地基基础措施。消除或减小溶陷性的各种地基处理方法，如采取浸水预溶、强夯、换土及桩基础等措施。

3）结构措施。加强结构整体性、减少不均匀沉降。

4）防腐措施。对混凝土基础、拉线棒等铁件采用抗硫酸盐水泥和外敷涂料等有效措施。

5）防腐涂料的选用应以施工操作方便、价廉经济、耐久、附着力强、抗老化性能好、寿命长为原则。

6）对地下水位较高的地段，要考虑有害毛细管水对基础的腐蚀影响，设计可采用砂卵石作垫层处理。

（2）盐渍土地区的输电线路杆塔地基处理必须根据盐渍土的特性并综合考虑地形、地貌条件土中水分的变化情况等因素因地制宜采取防治结合综合治理的措施。

（3）当地基中易溶盐含量超过 0.3%地区的杆塔地基需采取防腐处理。

（4）盐渍土地基中硫酸钠含量不超过 1%时可不考虑其盐胀性。

SY/T 0317—2012《盐渍土地区建筑规范》中规定了几种盐渍土地区地基处理措施，列入表 9-89 中。地基基础的处理措施，应根据盐渍土溶陷等级及现场条件进行技术经济比较后综合选用。

表 9-89 盐渍土地区地基处理措施

处理措施	适用条件	备 注
换填法	适用于地下水埋置深度较深的浅层盐渍土地基	1）换填料应为非盐渍土的级配砂砾石和中粗砂、碎石、矿渣、粉煤灰等； 2）垫层设计中应做好地基排水设计，防止垫层被盐渍化，宜设置盐分隔断层
预压法（排水固结法）	适用于处理盐渍土地区的淤泥质土、淤泥和冲填土等饱和软土地基	1）对重要工程或大型工程，应选择有代表性的场地进行预压法试验，通过试验确定岩土体强度变形参数和地下水运移特征，指导设计和施工； 2）排水竖井的间距宜适当减小
强夯法和强夯置换法	适用于处理盐渍土地区的碎石土、砂土、非饱和粉土和黏性土地基以及由此组成的素填土和杂填土地基	1）强夯法和强夯置换法的有效加固深度、夯击工艺和参数应通过当地试验或现场试夯确定； 2）填料应为非盐渍土的砂石类集合料，并应做好基础地下排水设计
砂石（碎石）桩法	包括用挤密法施工的砂石桩和用振冲法施工的砂石桩，适用于处理盐渍土地区的砂石、碎石土、粉土、黏性土、素填土和杂填土等地基	砂石桩顶和基础之间宜铺设一层厚 500mm 左右的碎石垫层，并做好地下排水设施，宜在基础和垫层间设置盐分隔离层
浸水预溶法	适用于处理厚度较大、渗透性较好的盐渍土地基	1）采用浸水预溶法时，应考虑下列问题： ①应有充足的低矿化度水源； ②宜选在夏末秋初土温高，蒸发量小时进行浸水施工； ③宜在地下水较深时使用。 2）采用浸水预溶法时，应符合下列要求： ①浸水坑的平面尺寸每边超过拟建建（构）筑物基础边缘 2～5m； ②浸水坑水头高度不小于 300mm； ③检测予溶深度及所消除的溶陷量； ④重新检验预溶后的盐渍土主要土性指标； ⑤浸水施工时，应防止对邻近建（构）筑物以及管、沟、道路等产生不利影响。 3）浸水预溶法可与强夯法、预压法等其他地基处理方法结合使用。 4）重大工程或大型工程，施工前应进行浸水试验，确定浸水量、浸水所需时间、浸水有效影响深度和浸水降低的溶陷量等

（二）盐渍土地区基础的防腐

1. 盐渍土地区基础防腐的具体措施

在盐渍土地区，基础根据盐渍土腐蚀强度等级的不同，所采取的基础防腐的外防护措施也各不同。在采用具体的防腐措施时，要认真判断塔位环境，仔细分析地下水以及地表水分对于塔位基础的影响。对具有腐蚀性的塔位，应根据具体腐蚀等级按照 GB 50046—2008《工业建筑防腐蚀设计规范》的相关规定，并结合腐蚀地区工程已有经验执行。

（1）对弱腐蚀地区，基础混凝土强度等级采用C30，最大水胶比 0.5，最小水泥用量 300kg/m³，不再采取其他外防护措施，混凝土垫层最低强度等级 C20，最小厚度 100mm。对灌注桩基础混凝土等级不小于C35，最大水胶比 0.45。

（2）对中腐蚀地区，基础混凝土强度等级采用C35，最大水胶比 0.4，最小水泥用量 320kg/m³，混凝土垫层最低强度等级 C25，最小厚度 100mm。开挖基础表面及垫层顶面全部采用防腐蚀涂层进行防护，掏挖基础、挖孔桩基础和灌注桩基础在地表附近涂刷表面防腐涂层进行防护。涂刷范围为地面以下 500mm 及地面露出部分。

（3）对强腐蚀地区，基础混凝土强度等级采用C40，最大水胶比 0.36，最小水泥用量 340kg/m³，混凝土垫层最低强度等级 C25，最小厚度 100mm。开挖基础表面及垫层顶面全部采用防腐蚀涂层进行防护。

在采取有效隔离、防水措施的条件下，强腐蚀地区可采用灌注桩基础，混凝土强度等级 C50，最大水胶比 0.36。在地面以下 500mm 及露出地面部分涂刷防腐涂层。隔离措施可以采用裹体灌注桩等工艺，并需开展现场应用试点工作。

裹体灌注桩是采用防水的土工材料将桩体包裹起来，使桩体材料与桩围土和水隔绝，起到防止腐蚀作用。裹体灌注桩在盐渍土地基中应用的关键技术是桩体的包裹材料的选用、试验和研究。根据青海省建设厅《混凝土裹体桩在内陆盐渍土地基中应用试验研究报告》结论，确定混凝土裹体桩的包裹材料采用“二布一膜”复合土工布方案。二布为内、外衬层即保护层和支持层，增加复合土工布的强度，提高土工布与土相互作用摩擦阻力和土工布与混凝土黏合力；中间为土工膜（HDPE 膜）起到隔水和阻水作用。土工布用 WJF-1 型聚丙烯（丙纶）长丝机织布，单位面积质量 170g/m²，二层单位面积质量为 340g/m²，强度等各项指标通过试验能够达到设计和施工使用的要求；土工膜选用 300g/m² 的高密度聚乙烯热压成型 HDPE 膜，膜体厚度均匀，阻水、阻汽性能高。热压制成的高强度机织防渗复合土工布的单位面积质量 648g/m²，厚度 1.29mm。聚乙烯和聚丙烯是近族高分子材料，亲和力强，容易热压成一体。它的特点是使用寿命很长、耐水压、耐腐蚀、强度高、耐磨损、耐低温、无毒性、防渗功能高。

研究报告证明使用的二布一膜复合土工布与土相互作用的摩擦阻力与地层土的摩擦阻力相近，可以用工程勘察的参数设计和计算混凝土裹体桩单桩竖向极限承载力。

强腐蚀地区灌注桩采用裹体桩施工质量控制措施主要有：

1）地面有承台及连梁灌注桩时，灌注桩及地面以上部分浇筑完毕，且地面以上部分拆模后，自桩头以上（承台、连梁）部分混凝土表面涂刷改性高氯化聚乙烯（HCPE）防腐蚀涂层。

2）地面无承台及连梁灌注桩时灌注桩及地面以上部分浇筑完毕，且地面以上部分拆模后，要求裹体灌注桩施工方做好桩头防腐保护。

3）钢筋混凝土保护层厚度不小于 50mm，灌注桩基础钢筋混凝土保护层在中腐蚀地区不小于 55mm，强腐蚀地区不小于 65mm。

4）基础表面防腐蚀涂层推荐采用改性高氯化聚乙烯（HCPE），中等腐蚀地区涂层干膜厚度不小于 200μm，强腐蚀地区不小于 300μm。

2. 盐渍土地区基础防腐的其他要求

在盐渍土腐蚀地质，除采用上述的处理措施以外，还应注意下列事项。

（1）在基坑开挖前，准备好相关降水、排水设施，在基础施工中应随时做好排水工作，保持基坑无地下水。

（2）当垫层混凝土终凝后（约 8h），在垫层顶面涂刷改性高氯化聚乙烯（HCPE）防腐蚀涂层。

（3）基础拆模后应在全部混凝土表面干燥条件下涂刷 HCPE 防腐蚀涂层。

（4）待涂完最后一道涂层，漆膜完全干燥后方可回填夯实基坑，回填时，注意保护好漆膜不受破坏。

（5）回填注意事项：

1）回填前应排尽坑内积水、杂物，要事先确定排水地点，排水点应尽量远离基坑，不得随意排水，以免污染环境。

2）应从基坑四周进行回填，避免从一侧回填时导致基础移动。回填土中不得含有树、草等有机杂物及大石块等。回填土每 300mm 夯实一次。

3）立柱露出地面部分用草袋或其他覆盖物遮严后，浇水养护。

4）回填后防沉土应高于地面 300～500mm，且须夯实。其表面按不小于 3%的坡度做好散水坡，其上严禁耕种和灌溉，散水坡的范围不小于基坑外边缘再加 0.5m，散水坡层下的素土也应夯实 300mm。

（6）掏挖基础和挖孔基础，在掏挖基础、挖孔基础桩体及地面以上部分混凝土浇注完毕，且地面以上部分拆模后，自地面以下500mm及地面露出部分混凝土表面涂刷改性高氯化聚乙烯（HCPE）防腐蚀涂层。待涂完最后一道面漆，且漆膜完全干燥后方可回填夯实基础，回填时注意保护好漆膜不受破坏。

（7）钻孔灌注桩基础防腐措施：

1）中腐蚀地区：需在灌注桩及地面以上部分混凝土浇注完毕，且地面以上部分拆模后，进行防腐处理。自地面以下 500mm 及地面露出部分混凝土表面涂刷改性高氯化聚乙烯（HCPE）防腐蚀涂层。

2）强腐蚀地区：对于地面有承台及连梁灌注桩，灌注桩及地面以上部分浇注完毕，且地面以上部分拆模后，自桩头以上（承台、连梁）部分混凝土表面涂刷改性高氯化聚乙烯（HCPE）防腐蚀涂层。对于地面无承台及连梁灌注桩，灌注桩及地面以上部分浇注完毕，且地面以上部分拆模后，要求灌注桩施工人员做好桩头防腐保护。

（8）只对混凝土基础涂刷防腐涂料，保护帽可不做防腐处理。

（9）中、强腐蚀地区基础混凝土中需加入粉煤灰、磨细矿渣、硅灰等矿物掺合料，具体种类、品质和掺量通过试验确定。

（10）Cl^-强腐蚀地区的基础混凝土中应添加钢筋阻锈剂，其品种和用量可根据Cl^-不同含量，根据电化学试验确定。

（11）地下水位较高的中、强腐蚀地区大开挖基础可采用玻璃钢模板防护措施，混凝土强度等级可降低一级。

四、湿陷性黄土

GB 50025—2004《湿陷性黄土地区建筑规范》中定义的湿陷性黄土是指在一定压力下受水浸湿土体结构迅速破坏，并产生显著附加下沉的黄土。湿陷性黄土具有以下几种土质特征：

1）湿陷性：黄土在受水浸湿后，在自重压力或附加压力下，产生土质结构中的易溶盐类溶解，使颗粒间作用力遭受破坏，且互引力大于自身重力，引致土粒形成蜂窝状结构，并在外荷载作用下，致使土粒间隙之间扩展、相通，最终造成土质强烈变形，强度下降，形成湿陷特征。

2）直立性：湿陷性黄土具有较高强度和较小的压缩性，在天然含水较少的状态下，能支撑近90°的天然陡壁边坡（见图9-83）。

3）膨胀性和崩解性：湿陷性黄土遇水膨胀，干旱收缩，反复交替造成土质易崩解并形成裂纹，影响地基质量。

4）难压实及水敏感性：湿陷性黄土的最大干密度、最佳含水量较高，难达到碾压密实条件，且湿陷性黄土对水含量敏感，含水量小易扬尘，大则翻浆。





图9-83 黄土的直立特性

（一）湿陷性黄土地基塔位选择原则

（1）当线路工程无法避免经过湿陷性黄土地区时，应尽量将塔位选择在非自重湿陷性黄土地基地区。因为非自重湿陷性黄土在自重作用下遇水不会湿陷或者湿陷量较小，对铁塔的基础影响较小。

（2）当塔位无法避开湿陷性黄土地基时，应尽量将塔位选在山顶较平坦处，植被较多处，避开地势较陡的山坡以及植被稀少的地段。

（3）应避免将受力较大的直线塔或者转角塔位选在新近堆积的松散的黄土地基上。

（4）对于地面坡度较大、植被稀疏的地段，由于夏季多暴雨，易造成奇峰、陡壁、溶洞、陷穴、天生桥等微地貌，塔位选择时应考虑避开该类地段。

（5）严禁将塔位选在地势低洼、冲沟等一些在雨季易汇水的地段。

（二）湿陷性黄土地基处理措施

1. 黄土地区输电线路杆塔的地基处理原则

黄土地区输电线路杆塔地基处理的一般原则如下：

（1）为保证湿陷性黄土地区杆塔基础的安全运行，应根据湿陷性黄土的等级和工程的重要性因地制宜采取以地基处理为主的综合措施，防止地基湿陷，做到安全可靠，经济合理。

（2）杆塔基础应远离水浇地、有汇水的地区，避开冲沟、落水洞等位置，宜使塔位位于无汇水或排水顺畅的位置。当塔位位于无汇水的山坡、山梁、山顶等位置时，可不采取处理措施；当塔位位于有汇水的平台、平地、洼地时，应根据电压等级、杆塔的重要性以及黄土湿陷等级采取不同的处理方式。

（3）大跨越塔、重要跨越塔及高塔（塔高 100m 及以上）应尽量避开湿陷性黄土地区，若不能避开时应采取可靠的地基处理。

（4）杆塔基础在按照现行 GB 50025—2004《湿陷性黄土地区建筑规范》相关规定进行设计，杆塔结构划分建筑物等级时，宜按照下列规定执行：

1）大跨越、重要跨越塔及高塔（100m 及以上）可按乙类建筑考虑。

2）在Ⅲ、Ⅳ 级自重湿陷性黄土地区的转角塔和塔高 50m 及以上的直线塔可按丙类建筑考虑。

3）塔高在 50m 以下直线塔（不含水浇地）按丁类考虑。

（5）属于丙类建筑的杆塔结构为消除地基部分湿陷量的最小处理厚度建议按表 9-90 的规定采用。

（6）在黄土地区的杆塔，其基面要做好防水措施，土表层严格夯实并设散水坡和排水沟，基础远离水渠和水管 10m 以上。

表 9-90　消除地基部分湿陷量的最小处理厚度　m

地基湿陷等级	湿陷类别		
	非自重湿陷性场地	自重湿陷性场地	
		悬垂型杆塔	耐张转角、终端及大跨越杆塔
Ⅱ	不处理	防水措施	防水措施
Ⅲ	—	1.0～1.5	1.5～2.0
Ⅳ	—	1.5～2.0	2.0～2.5

注 1. 地基处理宽度：悬垂型杆塔为基础边宽加上 0.6～1.0m；耐张转角、终端杆塔为基础边宽加上 1～1.5m；
2. 220kV 线路可根据上述要求酌情处理。

2. 黄土地区输电线路杆塔的地基处理措施

同其他建、构筑物相比，输电线路工程具有分散性、独立性、复杂性、运输困难等特点。鉴于以上原因，制定湿陷黄土处理原则时，宜灵活对待，在满足相关规程规范要求的同时，应结合以往工程的设计经验及运行经验，采取适合具体工程的处理原则。既要尽可能降低工程造价，又要简化施工、缩短工期。

湿陷性黄土产生下沉的条件是受水浸湿，只要抓住这个重要条件，综合考虑塔型、地形、湿陷等级和水等主要因素，湿陷黄土的处理问题即可迎刃而解。通常，应主要以防水为主，做好塔位排水，使地基土不受水侵蚀；当防水处理不能满足要求时，可采用相应的地基处理措施。

地基处理一般采用灰土垫层法。此方法由于采用人工作业，不需要专用设备，适用于各种地形条件，且对各级别黄土湿陷性均有较好地处理效果。灰土垫层坚固耐用，施工简便，造价低廉。特别是在我国广大的湿陷性黄土地区，采用灰土垫层（或灰土基础）不仅可改善黄土地基的受力状况，更重要的是它有较好的抗水防渗能力，是抵御湿陷性黄土地基湿陷变形的良好措施，因而得到了广泛的应用。在西北地区以往的输电线路工程中，有些采用 2:8 灰土处理的输电线路已经运行了 20～30 年，从未发生因黄土湿陷而导致基础下沉或塔基歪斜等事故。

根据 DL/T　5219—2014《架空输电线路基础设计技术规定》附录 B 中表 B.1.5 规定，对于Ⅱ级非自重湿陷性场地不需要进行处理，因此这里只对Ⅱ级及以上自重湿陷性场地的处理措施进行描述。

（1）位于山坡、山梁、山顶等位置的杆塔。对位于山坡、山梁、山顶等位置的杆塔，由于自然排水好，一般不易在塔位形成积水情况，地基受水侵蚀的可能较小，故一般不必做灰土垫层。同时推荐采用原状土基础。取代灰土垫层法，必要时应根据现场情况在塔位上方适当位置加设截水沟，将水流引向基础保护范围以外，并在基面做自然散水坡，将基面雨水排向塔位下方。基面散水坡坡度不小于 5%、应高出地面 300mm，每个塔腿处散水坡的范围需超出基坑坑口 1.5m，并不得小于 5.0m，且需夯实。散水坡具体做法应以排水畅通、对原始地形破坏少、外表美观为原则，因地制宜、灵活应用，散水坡水流方向应避开冲沟、落水洞等不良地貌及塔腿中心。

需要注意的是，当塔基位于施工或维修道路下方时，切忌山坡汇水沿道路进入塔位，从而导致塔基受水侵蚀。对于此类情况，应避免道路入口直接面对塔位。

（2）位于台阶地位置的杆塔。

1）地形利于自然排水，无汇水的塔位。对位于台阶地塔位，如果地形利于自然排水，无汇水时，推荐采用原状土基础。由于水渗入地基并与地基湿陷性黄土接触的可能较小，因此不需要对此类地区地基进行处理，但要做好基面散水。

2）地形不利于自然排水，且有汇水的塔位。对位于台阶地塔位，如果地形不利于自然排水，且有汇水时，基础型式根据具体情况合理选择开挖或者掏挖。

当湿陷等级较低时（Ⅱ级），宜采用 2:8 灰土垫层法，如图 9-84 所示。此垫层法是在基础底板以下采用 2:8 灰土回填夯实。垫层宽度和厚度按直线塔与转角塔

采用不同取值：直线塔垫层每边伸出基础底板边缘1.0m，厚度取1.5m；转角塔垫层每边伸出基础底板边缘1.5m，厚度取2.0m。

当湿陷等级比较高（Ⅲ级及以上）时，采用增设灰土垫层和防水层的处理方案效果更好，如图9-85所示。无论哪种方法，均要在基面做自然散水坡，以利于基面积水排向塔位外面。

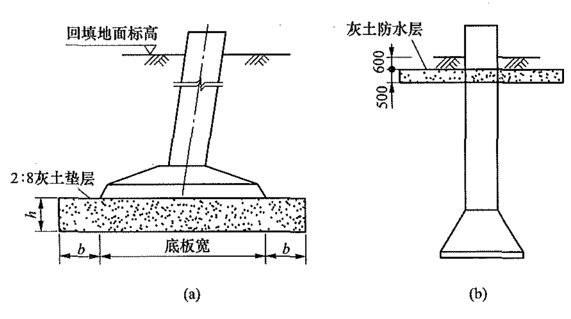


图9-84 灰土垫层处理方案示意图

（a）开挖基础；（b）掏挖基础

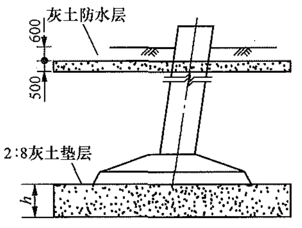


图9-85 灰土垫层加灰土防水层处理方案示意图

（3）位于平地（非水浇地、无汇水、有少量雨水等）位置的杆塔。对位于平地有少量雨水汇集的塔位，当塔位湿陷等级较低（Ⅱ级）时，无须进行地基处理，既可采用掏挖基础，也可采用开挖基础；

当塔位湿陷等级较高（Ⅲ级）时，可在基坑顶部铺设防水层，使用的材料一般为2:8灰土，如图9-86所示，该防水层地面以下1m位置开始，换以0.5m厚2:8灰土垫层，其上再铺设至少0.6m厚的黄土，防水层范围为每边超出基坑0.5m。

当塔位立在湿陷性等级特别高（Ⅳ级）的地区时，采用上述的灰土垫层和防水层法（见图9-87）。

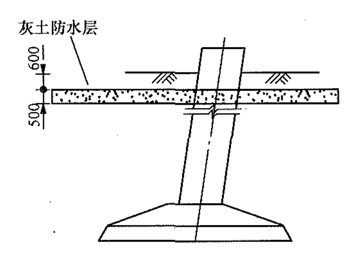


图9-86 平地区段灰土防水层示意图

（4）位于平地（水浇地、汇水量大）等位置的杆塔。对位于平地有雨水和汇水可能的塔位，宜推荐采用大开挖基础，并且采取2:8灰土垫层加防水层处理，除了在基坑顶部铺设防水层外，还应在每个独立基础底面的四周铺设隔水带，以增强其防水效果，隔水带的设置方法及尺寸见图9-87。

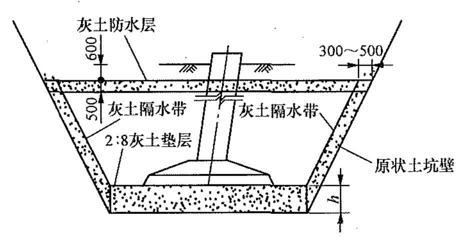


图9-87 灰土垫层加防水层加隔水带示意图

（三）湿陷性黄土地区基础施工及运行注意事项

湿陷性黄土地区的基础施工及运行尚需注意以下事项：

（1）基坑开挖之前，应对基坑周围5～10m范围内的地下坑穴进行探查与处理，并绘图和详细记录其位置、大小、形状及填充情况。

（2）施工基础时，宜缩短基坑的暴露时间。在雨季、冬季施工时，应采取专门措施，确保工程质量。切忌垫层或基础以下的原状土受水侵蚀或浸泡，避免基础施工完毕基底产生不均匀沉降。若出现坑内积水或基底受水浸泡的情况，一定要将水或泥清理干净，直至原状土充分外露，即使坑深超挖也不能停止，超挖部分应采用灰土回填。

（3）施工中，临时的水池、洗料场等设施至基坑边缘的距离，在非自重湿陷性黄土场地，不宜小于12m；在自重湿陷性黄土场地，不宜小于25m。临时搅拌站至基坑边缘的距离，不宜小于10m，并应做好排水措施。

（4）取土位置至基坑边缘的距离，在非自重湿陷性黄土场地，不宜小于12m；在自重湿陷性黄土场地，不宜小于25m。

（5）在现场堆放材料和设备时，应采取有效措施保持场地排水畅通。对需要浇水的材料，宜堆放在距基坑边缘5m以外，浇水时必须有专人管理，严禁水流入基坑内。

（6）浅基坑的开挖与回填，应符合下列规定：

1）当基坑开挖至设计深度或标高时，应进行验槽；

2）当基坑内的土挖至接近设计标高，而下一工序不能连续进行时，宜在设计标高以上保留300～500mm厚的土层，待继续施工时挖除。

（7）从基坑内开挖出的土，堆放距离基坑的边缘不宜小于2m。

（8）设置灰土垫层或施工基础前，应在基坑地面打夯底，同一夯点不宜少于3遍。当表层土的含水量

过大或局部地段有松软土层时，应采取晒干或换土等措施。

（9）基础施工完毕，其周围的灰、砂等，应及时清除，并应采用素土在基础周围分层回填夯实，其压实系数不宜小于0.93（具体施工方法及要求按规范执行）。

（10）基坑的支护与施工，应综合分析工程地质与水文地质条件、基础类型、基坑开挖深度、降排水条件、周边环境对基坑侧壁位移的影响、基坑周边荷载情况、施工季节等因素，做到因地制宜，合理设计、精心施工、严格监控。

（11）施工排水措施。不管平地还是台阶地，除做防水层外，还应注意附近是否有排水沟，地下管道等不利设施。如存在这些不利设施，尚应处理由此引起的相关问题，如排水沟改道，加强地下管道的防漏等。截水沟可根据当地资源情况采用浆砌石、现浇混凝土、预制混凝土等多种形式。

（12）塔基汇水对基面的影响。来自铁塔本身的汇水往往会对新建线路基面产生冲蚀影响，线路运行初期应加强此类问题的巡查，及时恢复基面。此类问题在基面植被恢复后即可解决。

（13）关于接地沟。在水浇田或易汇水的塔位，接地沟往往是将水引入基础位置导引线，对于这些塔位，一定要保证接地沟充分夯实回填，或者必要时采用2:8灰土隔水。

（14）关于植被恢复。在施工完毕后，对于在山顶、山坡的塔位应做好植被恢复，如浆砌骨架植草或三维土工网植草；对于在平地的塔位，应注意做好基面散水，回填夯实，必要时要在施工完地面种植草，以防止水土流失。

对个别地形复杂，或按以上方法处理有些不妥的塔位，可变换防水方法或进行综合处理。

五、冻土

冻土，一般是指温度在零度或零度以下，并含有冰的各种岩土和土壤，冻土是由矿物颗粒、冰、未冻水、气体等组成的多成分和多相体系。

冻土的分类应满足JGJ 118—2011《冻土地区建筑地基基础设计规范》的要求。根据土冻结状态的持续时间，将地基土分为季节冻土和多年冻土。季节冻土和多年冻土季节融化层土的冻胀性，根据土冻胀率η的大小，可划分为不冻胀、弱冻胀、冻胀、强冻胀和特强冻胀五种类型。根据土融化下沉系数δ_0的大小，多年冻土可分为不融沉、弱融沉、融沉、强融沉和融陷五种类型。

在我国东北、华北、西北等地广泛分布着季节冻土，其中在大小兴安岭、青藏高原及西部高山区还分布着多年冻土，这些地区的地表层都存在着一层冬冻夏融的冻结—融化层。

作为地基的冻结—融化层，在其冻融过程中土体性质的变化直接影响着上部建筑物的稳定性。冻土地区对基础造成危害的主要原因是作用于基础上的切向冻胀力。

（一）多年冻土地区基础设计

在多年冻土地区杆塔定位时，宜选择融区、基岩出露地段和粗粒土分布地段，在零星岛状多年冻土区，不宜将多年冻土用作地基。

将多年冻土用作建筑地基时，可采用下列两种状态之一进行设计：

（1）保持冻结状态。在施工期间和使用期间均保持地基土处于冻结状态。保持地基土冻结状态设计宜用于以下场地或地基：

1）高含冰率的场地；

2）多年冻土年平均地温低于–1.0℃的场地；

3）持力层范围内的土层处于坚硬冻结状态的地基；

4）多年冻土年平均地温高于–1.0℃，但采取工程措施可维持基底冻土冻结状态的场地。

（2）允许融化状态。地基中的多年冻土允许在施工期间和使用期间自然融化或预先融化。

1）自然融化状态的设计宜用于以下地基：不融沉或弱融沉的地基；施工期间和使用期间总变形量不超过允许值的地基。

2）预先融化状态的设计宜用于以下地基：多年冻土厚度较薄，且变形量不满足要求的地基；年平均地温较高，且存在变形量不满足要求的融沉、强融沉和融陷。

多年冻土地区可根据输电线路设计类型、上部结构特点、冻土地基条件及所采用的设计状态，结合表9-91进行基础选型。

表9-91　适用于多年冻土区的主要基础类型

序号	基础类型	基础特点	适用地区
1	桩基础	对冻土地基热扰动较小，应用范围广，施工工艺成熟，需要大型机具，施工难度大，施工费用较高	适用于所有冻土地区。尤其是地下水位较高地区，高温高含冰率、强冻胀地区，河流滩地的融区等。盐渍化冻土、冻土泥炭化层、强融沉地区可采用桩基础
2	锥柱基础 扩展基础 台阶基础	施工工艺简单，混凝土用量大，基础外表面容易采取减小切向冻胀力的辅助措施	适用于活动层较薄，便于开挖，地下水位埋藏较深地区。同等条件下，强冻胀、特强冻胀塔位优先采用锥柱基础

续表

序号	基础类型	基础特点	适用地区
3	掏挖基础 挖孔基础	力学性能较好，抗拔、抗倾覆承载能力强，基坑开挖量小，不需支模、回填，有利于环境保护	适用于丘陵、山地地形，地质条件较好，可人工成孔地区
4	预制装配基础	强度较高，混凝土质量易保证。制造条件严格，运输成本高，需要起重机械	适用于交通便利、便于机械作业，地基承载力高、地下水位埋藏较深的塔位

设计融深可按下式计算。

$$Z_{d}^{m}=Z_{o}^{m}\psi_{s}^{m}\psi_{w}^{m}\psi_{c}^{m}\psi_{t0}^{m} \qquad (9\text{-}311)$$

式中 Z_{o}^{m}——标准融深（m），应根据当地实测资料确定；

ψ_{s}^{m}——土的类别对融深的影响系数，按表9-92的规定采用；

ψ_{w}^{m}——融沉性对融深影响系数，按表9-93的规定采用；

ψ_{t0}^{m}——场地地形对融深影响系数，按表9-94的规定采用；

ψ_{c}^{m}——地表覆盖影响系数，按表9-95的规定采用。

表9-92 土的类别对融深的影响系数（ψ_{s}^{m}）

土质（岩性）	黏性土	细砂、粉砂、粉土	中、粗、砾砂	碎（卵）石土
ψ_{s}^{m}	1.00	1.20	1.30	1.40

表9-93 融沉性对融深的影响系数（ψ_{w}^{m}）

湿度（融沉性）	不融沉	弱融沉	融沉	强融沉	融陷
ψ_{w}^{m}	1.00	0.95	0.90	0.85	0.80

表9-94 场地地形对融深的影响系数（ψ_{t0}^{m}）

地形	平坦地面	阴坡斜坡	阳坡斜坡
ψ_{t0}^{m}	1.00	0.90	1.10

表9-95 地表覆盖影响系数（ψ_{c}^{m}）

覆盖类型	地表草炭覆盖	裸露地表
ψ_{c}^{m}	0.70	1.0

当地无气象台站观测资料时，标准融深可按下列公式计算，并结合当地经验综合确定：

1）对青藏高原多年冻土地区（包括西部高山多年冻土），可按下式计算。

$$z_{0}^{m}=0.195\sqrt{\sum T_{m}}+0.882 \qquad (9\text{-}312)$$

2）对东北多年冻土地区（包括东北高山多年冻土），可按下式计算。

$$z_{0}^{m}=0.134\sqrt{\sum T_{m}}+0.882 \qquad (9\text{-}313)$$

式中 $\sum T_{m}$——建筑地段气温融化指数的标准值（℃·月），采用当地气象台站10年以上观测值的平均值。当无实测资料时，可按JGJ 118—2011《冻土地区建筑地基基础设计规范》规定的中国融化指数标准值等值线图选取。

3）对我国山地多年冻土地区，气温融化指数标准值，可按下列公式计算。

东北地区

$$\sum T_{m}=(7532.8-90.96L-93.57H)/30 \qquad (9\text{-}314)$$

青海地区

$$\sum T_{m}=(10\,722.7-141.25L-114.00H)/30 \qquad (9\text{-}315)$$

西藏地区

$$\sum T_{m}=(9757.7-71.81L-140.48H)/30 \qquad (9\text{-}316)$$

式中 L——塔基的纬度，（°）；

H——塔基的海拔高度（100m）。

（二）季节性冻土地区基础设计

1. 季节性冻土地区地基抗冻拔稳定计算

（1）基础极限抗冻拔稳定验算的荷载。对于受拉基础，基础上拔力取用冬季最大设计风荷载与标准冻结深度产生的切向冻胀力组合值；对于受压基础，基础上拔力取用无风、无冰、最低温时的标准冻结深度产生的切向冻胀力值。

对于浅埋台阶基础，抗拔力取基础自重力（地下水位以下取浮重度）、上部结构自重力、冻土抗剪角以内的有效地基土重力之和；对于桩基础，抗拔力取基础与不冻土产生的摩阻力、上部结构自重力、基础有效自重力之和。

（2）基础极限抗冻拔稳定按下式计算。

$$\gamma_{f}T_{0}\leqslant G_{0} \qquad (9\text{-}317)$$

式中 T_{0}——冬季荷载上拔作用力，直线塔取 $T_{0}=0.6T_{T}+\tau_{T}$，非直线塔取 $T_{0}=T_{T}+\tau_{T}$，kN；

T_{T}——60%的正常风荷载同100%的线条角度荷载产生的上拔作用力，kN；

τ_{T}——标准冻结深度产生的切向冻胀力，kN；

G_{0}——抗拔力，kN。

2. 季节性冻土地区地基选型

国内外工程界的实验研究结果，比较适用于输电线路地基与基础的主要有以下几种：

（1）标准冻深较小且位于地下水位以上的塔位，可选择侧向填砂处理。用基侧填砂来减少或消除切向冻张力是最简单易行的方法。地基土在冻结膨胀时所产生的冻胀力通过土与基础牢固冻结在一起的剪切面传递，砂类土的持水能力很小，当砂土处于地下水位之上时，其力学性能接近松散冻土，所以砂土与基础侧面冻结在一起的冻结强度很小，可传递的切向冻胀力很小。

对于冻土的冻深比较浅的塔位，基础埋深远超设计冻深，可采用常规直柱基础，基础立柱周围采用侧向填砂或者按考虑冻胀力后的基础作用力设计基础。

（2）基础作用力较小的塔位且不适合侧向填砂的塔位，选择梯形斜面基础。国内外工程界进行的试验研究结果表明，其侧面坡度≥1:7 为宜，基础侧面设计的斜面可消除切向冻胀力。但是对于杆塔的基础作用力较大，基础埋置较深的情况，采用梯形截面的基础混凝土量较大，经济性较差。

（3）位于低洼积水地区且无排水条件的杆塔，优先采用桩基础；在有排水条件的杆塔位，应做好排水设施防止施工和使用期间的雨水、地表水、生产废水和污水浸入地基。

采用桩基础，就是利用桩基础在不冻土中的桩土间摩擦力（或冻结阻力），平衡冻胀土区域内作用于铁塔基础上的切向冻胀力。基础入土深度应满足正常设计荷载和克服切向冻胀力验算所需的设计深度，但是要保证基础施工时桩在冻深范围内桩身光滑、不出现扩大头现象。

3. 减小或消除冻胀力的措施

结合国内现行规范及工程界的实验研究结果，对冻胀型地基土，可采取下列减少或消除冻胀力的危害措施：

（1）改变地基土冻胀性的措施。

1）设置防止施工和使用期间的雨水、地表水生产废水和生活污水浸入地基的排水设施。在坡地或山区设置截水沟以排走地表水和潜水流，避免因地基浸水、含水率增加而造成冻害；

2）对低洼场地，加强排水并采用非冻胀性土填方；

3）在基础外侧面，可用非冻胀性土层或隔热材料保温，其厚度和宽度宜通过热工计算确定；

4）可用强夯法消除土的冻胀性。

（2）结构措施。

1）增加铁塔的整体刚度，设置钢筋混凝土基础联梁；当基础设有联梁且梁下有冻胀性土时，为防止因土冻胀将基础联梁拱裂，应在梁下预留 150～300mm 的空隙。也可在梁下回填 300mm 以上炉渣等松散性材料。

2）采用桩基础。

（3）减少和消除切向冻胀力的措施。

1）基础在地下水位以上时，基础侧表面可回填非冻胀性的中砂和粗砂，其厚度不小于 200mm。

2）应对与冻胀性土接触的基础侧表面进行压平、抹光处理。

3）可采用物理化学方法处理基础侧表面或与基础侧表面接触的土层。

4）可做成正梯形的斜面基础。

4. 设计冻深的计算

设计冻深 Z_d 可按下式计算。

$$Z_d = Z_0 \psi_{zs} \psi_{zw} \psi_{zc} \psi_{zt0} \tag{9-318}$$

式中 Z_0 ——标准冻深（m）。无实测资料时，除山区外，应按 JGJ 118—2011《冻土地区建筑地基基础设计规范》规定的“中国季节冻土标准冻深线图”查取；

ψ_{zs} ——土的类别对冻深的影响系数，按表 9-96 的规定采用；

ψ_{zw} ——冻胀性对冻深的影响系数，按表 9-97 的规定采用；

ψ_{zc} ——周围环境对冻深的影响系数，按表 9-98 的规定采用；

ψ_{zt0} ——地形对冻深的影响系数，按表 9-99 的规定采用。

表 9-96　土的类别对冻深的影响系数 ψ_{zs}

土的类别	ψ_{zs}	土质（岩性）	ψ_{zs}
黏性土	1.00	中、粗、砾砂	1.30
细砂、粉砂、粉土	1.20	碎（卵）石土	1.40

表 9-97　冻胀性对冻深的影响系数 ψ_{zs}

湿度（冻胀性）	ψ_{zw}	湿度（冻胀性）	ψ_{zw}
不冻胀	1.00	强冻胀	0.85
弱冻胀	0.95	特强冻胀	0.80
冻胀	0.90	—	—

表 9-98　周围环境对冻深的影响系数 ψ_{zc}

周围环境	ψ_{zc}	周围环境	ψ_{zc}
村、镇、旷野	1.00	城市市区	0.90
城市近郊	0.95	—	—

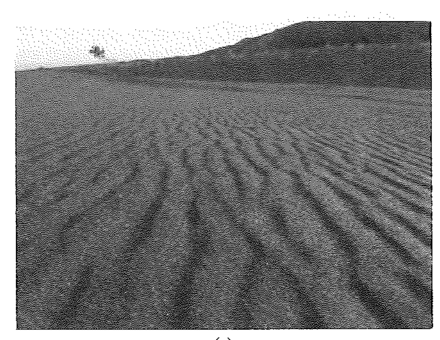
注 1. 人口为 20 万～50 万的城市市区，按城市近郊影响取值；
2. 人口大于 50 万且小于或等于 100 万的城市市区，按市区影响取值；
3. 人口为 100 万以上的城市，除计入市区影响外，尚应考虑 5km 的近郊范围。

表 9-99　　地形对冻深的影响系数 ψ_{zt0}

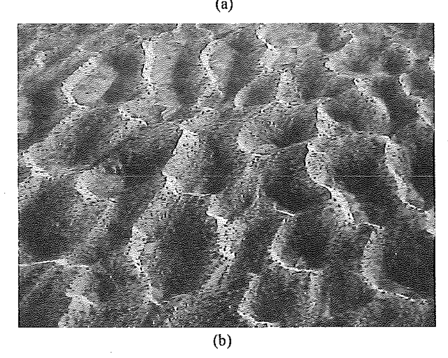
地形	ψ_{zt0}	地形	ψ_{zt0}
平坦	1.00	阴坡	1.10
阳坡	0.90	—	—

六、风积沙沙漠地区

沙漠风积沙是在干旱、半干旱区形成的一种特殊性质的沙，其物理力学性质同水成沙及一般地区的砂土相比，有较大差别。一方面其流动性大，无黏聚力整体强度差。另一方面，沙漠地区自然条件恶劣，风蚀和沙埋等不良地质现象发育，基础施工材料匮乏，工程施工和运营维护难度大。较为常见的沙丘特征有沙垄、梁窝状沙丘及流动沙丘等。其中，沙垄属于固定沙丘，梁窝状沙丘属于半固定沙丘，如图 9-88 所示。



(a)



(b)

图 9-88　最主要的沙丘形态

（a）沙垄；（b）窝状沙丘

（一）基础型式选择

考虑到沙漠风积沙地质条件的特殊性，砂土较为松散，不宜采用原状土类基础，所以推荐采用开挖类基础。沙漠地区的开挖类基础可采用直柱扩展基础、偏心直柱扩展基础、斜立柱扩展基础、装配式基础等。

对于具体应用上，需根据工程的基础负荷特点，并综合考虑所选塔位地形、地质、交通条件等因素，从经济性和施工便利性的角度综合考虑，选用合适的基础型式。

风积沙地基中基坑可采用机械辅助开挖，宜采用台阶式边坡和加挡土板相结合的支护方式，放坡角度宜根据经验确定，当沙体含水量较大时，坡度可适当加大，当含水量较小时，坡度应适当放缓。

在基础拆模、基础安装经质量检查符合设计规定及质量标准后，应及时回填风积沙土，回填前应先排出坑内积水。应采取分层填实，每层厚度应小于 0.5m，填土至预定高度后应进行超填，最终填土面应比设计标高 0.3m。

（二）防风固沙措施

根据沙丘类型及塔位重要性，可按表 9-100 选择防风固沙措施。

表 9-100　　防 风 固 沙 措 施

沙丘类型	塔位重要性	防风措施建议
移动沙丘	一般塔位	应用草方格（或尼龙网格）沙障固沙，基底沿 45° 角冲切破坏锥体外延 2m 范围铺设；并应在迎风面一侧草方格前沿布置 35%～40%孔隙率的阻沙栅栏，布置长度为草方格外各外延 1m，并应在阻沙栅栏前布置 2～3m 的草方格沙障
	重要塔位	除应采用一般塔位的防风固沙措施外，并应采用加筋复合地基对回填土地基进行处理
半移动沙丘	一般塔位	应用草方格（或尼龙网格）沙障固沙，基底沿 45° 角冲切破坏锥体外延 2m 范围铺设；并应在迎风面一侧草方格前沿布置 35%～40%孔隙率的阻沙栅栏，布置长度为草方格外各外延 1m，并应在阻沙栅栏前布置 2～3m 的草方格沙障
	重要塔位	除应采用一般塔位的防风固沙措施外，宜采用加筋复合地基对回填土地基进行处理
固定沙丘	一般塔位	应用草方格（或尼龙网格）沙障固沙，基底沿 45° 角冲切破坏锥体外延 1m 范围铺设
	重要塔位	应用草方格（或尼龙网格）沙障固沙，基底沿 45° 角冲切破坏锥体外延 2m 范围铺设

注　重要塔位指耐张转角、终端、大跨越塔，一般塔位指除重要塔位外的其他塔位。

1. 草方格固沙

对于沙漠地区，沙子起动标志着地表风蚀的开始。因此，限制沙子的起动对风积沙地区固沙起着至关重要的作用。草方格在沙漠公路和铁路两旁以及输电线路下的防沙工程中被大量采用，实践证明效果良好，流动沙面扎上草方格后，经过风蚀形成凹曲面，再经过雨水作用，凹曲面表层形成结皮，结皮比较光滑，隔绝了气流和结皮下面松散沙子的直接接触，工程界非常关心结皮的形成，如何改进工程措施以促使表层

结皮的快速生长，是一个相当重要的问题。

在一定的风速作用下，草方格的粗糙度和摩擦阻力将随草方格尺寸的变小而渐渐增大，当草方格宽度减小到某一尺寸后，粗糙度和摩擦阻力随草方格宽度减小而增大的趋势将变得很微弱或转为下降。但这种下降并不意味着草方格防护效益的降低，随着草方格尺度的减小，草方格对地表的屏蔽作用越来越强。

在塔架和布线工程完工之后，可将地基完全采用麦草或芦苇方格固定，其规格为 1m×1m，草头出露高度为 20～30cm。然后在草方格中人工种植红柳等沙生植物。这种方案的优点是：在草方格的保护作用下，种植的沙生植物具有较高的成活率。当所布置的麦草或芦苇方格因腐烂而失去防护作用时，种植的植物已初具规模，开始发挥防沙固沙的效用，而无需对草方格做过多的维护。草方格固沙如图 9-89 所示。

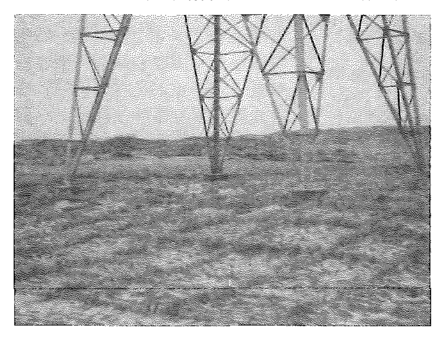


图 9-89　草方格固沙

2. 砾石覆盖和草方格沙障组合方案

对于植物不易成活的塔位建议采用这种方案，这种方案的具体做法为：在塔腿处 2m 范围内用砾石覆盖地表，砾石覆盖区外围布置草方格沙障。草方格布置范围大小可根据危害程度确定，在中度危害区宽度为 5m，重度沙害区宽度为 15m。此方案的优点是：可发挥砾石坚实耐久，抗风蚀能力强的特性，一方面可大幅度提高塔基周围的抗风蚀性能，另一方面可以方便工作人员进行线路维护。而在离塔基较远处布置一定范围的草方格可以避免砾石遭风沙掩埋。

砾石覆盖和草方格沙障组合方案如图 9-90 所示。



图 9-90　砾石覆盖和草方格沙障组合方案

3. 砾石网格固沙法方案

这种方法最早是青藏铁路沿线对路基防护的一种有效固沙措施，我们借鉴其实施经验，在西北地区一些输电线路工程的防风固沙中已经有了成功的应用。具体做法为：塔架和布线工程完工之后，在铁塔根开＋5m 的见方内，利用砾石堆砌成 100mm×250mm 的石垄，使其形成 1m×1m 的网格状。这种方案的优点是：可发挥砾石坚实耐久，抗风蚀能力强的特性，可以就地取材，操作方法简单，造价最为低廉，方便工作人员进行线路维护。

砾石网格固沙法方案如图 9-91 所示。

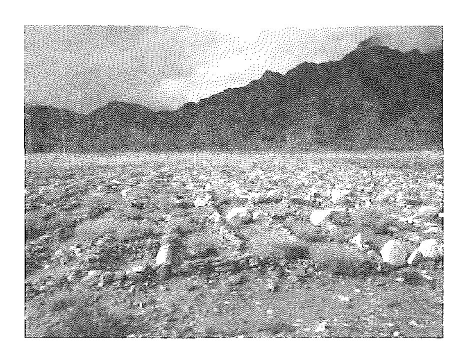


图 9-91　砾石网格固沙法方案

4. 回填土加筋处理

土工合成材料（主要指土工格栅与土工织物，相邻层间隔为 30～50cm）具有良好的抗拉强度、撕裂强度和较高的延展性、耐久性，针对输电线路杆塔基础主要承受抗拔荷载和倾覆荷载的特殊性，在地基土中铺设多层土工合成材料形成加筋复合地基，利用土工合成材料的上述工程特性，可使地基土体获得较高的准黏聚力，提高土体的抗剪、抗拉强度，增强地基的承载能力，提高输电线路杆塔基础的抗拔和抗倾覆稳定性。

加筋复合地基方案如图 9-92 所示。

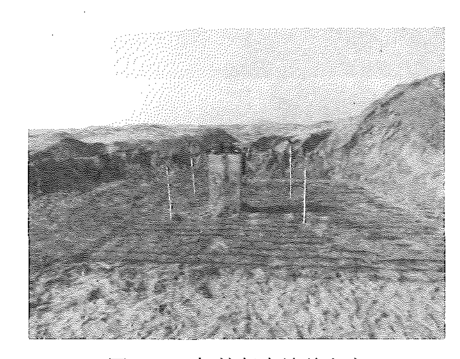


图 9-92　加筋复合地基方案

七、采动影响区

随着电网建设的不断发展，线路走廊日趋紧张，输电线路途经煤矿采空区的问题日渐突出。如何确保

拟建的线路安全通过压矿区及多种采动影响区，是一个复杂的工程技术问题，各矿山开采时间过程与沉陷状况不同，地质条件复杂多变，大小矿井开采方法多样，多种开采状况相互影响。矿产的大面积开采，必然引起采空区上方地表的移动和变形，造成地表的不均匀沉降，可使建筑物地基反力发生畸变，对基础及其上部结构产生附加作用力，造成建筑物的损害甚至破坏。在这些区域立塔，轻则可造成基础倾斜、开裂、杆塔变形，重则造成基础沉陷、杆塔倾倒，严重威胁输电线路的安全运行。

（一）采动影响区基础选型

采动影响区中杆塔基础的计算中，上拔和倾覆稳定计算按非采动影响区的杆塔基础设计方法进行，上拔和水平荷载的影响范围主要在基础上部和侧面有限范围内、下压稳定验算时需对地基的稳定性进行评价。

采厚比是说明采动影响区地表稳定性评价的重要指标，它的定义是煤层的埋深与煤层厚度的比值。线路位于现采动影响区、未来采动影响区时，根据不同的矿层厚度、采深采厚比和开采方式，宜采用表 9-100 采动影响区输电线路基础处理措施。

表 9-100　采动影响区输电线路基础处理措施

采深采厚比	基础处理措施	
	巷道式开采方式	长壁式开采方式
30～100	增加地脚螺栓外露长度＋钢筋混凝土板式基础＋防护大板①	增加地脚螺栓外露长度＋钢筋混凝土板式基础＋防护大板
100～150	增加地脚螺栓外露长度＋钢筋混凝土板式基础	增加地脚螺栓外露长度＋钢筋混凝土板式基础＋防护大板②
150～200	增加地脚螺栓外露长度	增加地脚螺栓外露长度＋钢筋混凝土板式基础
＞200		增加地脚螺栓外露长度

注　对于矿层顶板岩层松散的特殊地区，应进行地基稳定性专项评价，处理措施可参照上述规定适当加强。

① 当采用巷道式开采方式，开采厚度 3m 以内、回采率低于 30%、采深采厚比大于 50，且顶板岩层无地质构造破坏时，可仅采用增加地脚螺栓外露长度＋钢筋混凝土板式基础的措施。

② 当采用长壁式开采方式，采深采厚比为 100～150 时，对于重要输电线路，宜采用增加地脚螺栓外露长度＋钢筋混凝土板式基础＋防护大板的措施；对于常规线路，可仅采用增加地脚螺栓外露长度＋钢筋混凝土板式基础的措施。

联合大板基础能够一定程度的抵抗采动影响区垂直沉降、水平偏移和倾斜三种地基变形。联合大板基础是在 4 个独立基础底面设置一钢筋混凝土大板，板上、下层均配置钢筋，以抵抗由于不均匀沉降所产生的弯矩。基础与大板之间铺垫卵石加砂垫层，使基础与大板之间易于滑移，一方面降低地基变形后基础和杆塔的附加应力、预防破坏，另一方面也便于基础滑移后调整复位。

这种基础型式可以保证当地基发生一定程度不均匀沉降时，不会造成杆塔破坏，但不能保证基础根开不发生变化。采用直柱柔性基础并配合地脚螺栓与铁塔连接，当塔基稍有倾斜和位移时，便于调整基础底板或塔脚板将塔身恢复就位。

联合大板基础如图 9-93、图 9-94 所示。

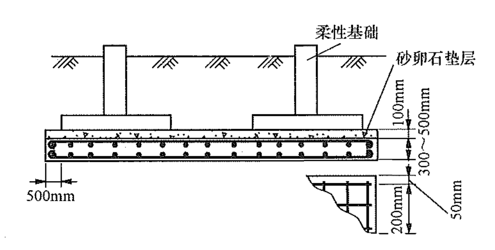


图 9-93　联合大板基础示意图

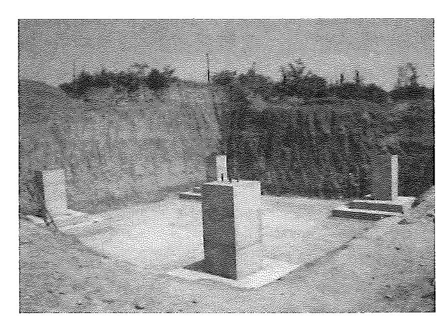


图 9-94　联合大板基础实景

（二）采动影响区铁塔基础连接

采动影响区铁塔和基础设计时应考虑基础发生不均匀沉降后的及时处理，位于采动影响区的杆塔若发生沉降、倾斜、不均匀沉降等现象时，可以调整杆塔与基础之间的连接部位，使杆塔在一定范围内扶正和复位，具体措施如下：

1. 增加地脚螺栓外露长度＋钢垫板

采动影响区地段的杆塔与基础均采用地脚螺栓＋塔脚板的方式连接，并适当增加地脚螺栓的外露丝扣长度，一旦地基下沉引起基础不均匀沉降，可以先将地脚螺栓放松，利用千斤顶顶升塔腿，调平后在塔脚板下垫钢板，实现杆塔调平。这种方案如图 9-95 所示。钢垫板厚度可系列化，采用 8、10、12、14、16、20mm 等厚度，以适应不同的沉降量，多层使用

时可垂直调向进行插垫。

工程实践证明，增加地脚螺栓外露长度＋钢垫板方案对于小范围内扶正杆塔是有效可行的。

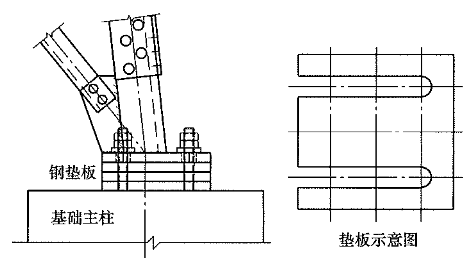


图 9-95　钢垫板安装示意图

2. 替换改造塔脚板

加长地脚螺栓并增插钢垫板的方案调整范围有限，为了进一步提高调整范围，可对塔脚进行适当的调整和改造，调整后的塔脚应在高度上有所提升，提高高度 H 为不均匀沉降的沉降值。

必要时可用调整后的塔脚将原有塔脚换掉，更换时先将地脚螺栓放松，用千斤顶将塔腿顶起，拆除原有塔脚，将新塔脚安装就位并连接后，恢复地脚螺栓，以此实现铁塔调平。

该方案已在国内 500kV 输电线路铁塔纠偏中应用。为方便铁塔纠偏，塔脚板的地脚螺栓孔也应适当加大。

塔脚改造示意图如图 9-96 所示。

（三）采动影响区地基处理措施

对于采深采厚比小于 30 的塔位，稳定性较差，易

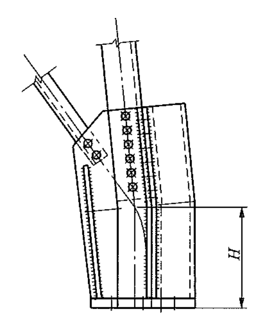


图 9-96　塔脚改造示意图

发生塔基失稳，不适宜立塔，如在此地段立塔地基需要处理，处理采空区不良地基的方法，大体上分为两个方面，其一是选用合适的基础形式，使上部建筑结构不受采空区不良地基影响；其二是针对采空区不良地基本身做文章，改善不良地基的岩土工程性质，提高其抗压强度，使其满足上部附加应力对其强度、变形的要求。地基处理方法如下：

1. 浅层高压喷射注浆

根据第四纪覆盖层厚度的情况采用高压喷射注浆采用快状加固形式加固浅部第四纪覆盖层，在杆塔基础下部周围形成统一整体刚性地基，加固深度可以通过数值模拟计算得出。

2. 采空区压力灌浆及覆岩离层注浆

在铁塔基础钻孔后，通过钻孔向铁塔基础或需要加固的采空区和岩石松动区灌注水泥浆；或钻较大孔径的孔后，通过钻孔向未垮塌的采空区和岩石松动区灌注流沙、粉煤灰或砂石混合料。

第十章

紧凑型线路

紧凑型线路通过对导线的优化排列，缩小相间距离，三相导线间无接地构件，增加相分裂根数，从而减小线路波阻抗、增大电容，达到提高自然输送功率的目的。同时可减少线路走廊宽度，提高单位走廊输电容量。

紧凑型输电技术在国内外应用较为广泛。目前，在俄罗斯、巴西和美国等国家均有应用，但因国情不同，其侧重点也不同。俄罗斯侧重于自然功率的提高，巴西、美国则侧重于缩小走廊宽度，而我国在这方面的研究倾向于两方面兼顾。在我国，从 1989 年开展紧凑型输电技术研究、设计及建设工作，目前已运行线路涉及的电压等级有 220、330kV 及 500kV。1994 年 9 月建成投运了我国第一条 220kV 紧凑型线路，线路总长 30km；1999 年 11 月建成投运第一条 500kV 紧凑型线路，线路总长 83km；2002 年在西北建成投运第一条 330kV 紧凑型线路，线路总长 115km。

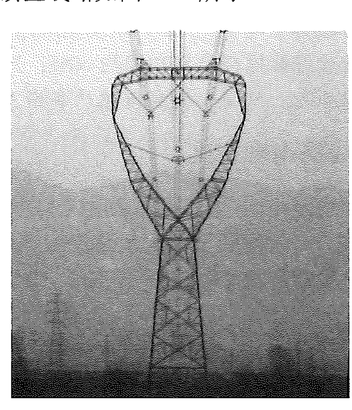
目前我国 750kV 及 1000kV 紧凑型线路主要关键技术研究也已取得重要进展。

第一节　紧凑型线路的特点

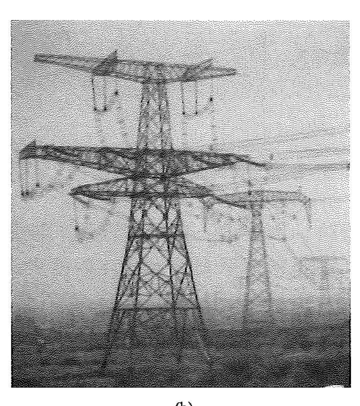
与常规型线路[1]相比，紧凑型线路主要具有如下几个方面特点。

一、塔头结构的布置形式

紧凑型线路与传统输电线路结构形式的主要区别在于悬垂直线塔可将三相导线置于同一塔窗，三相导线采取紧凑排列，大幅度压缩了相（线）间距离，220kV 线路线间距离减小至 3.4m，330kV 减少至 4.8m，500kV 可减小至 6.7m，线路三相导线均采用 V 型绝缘子串，较大档距加装相间间隔棒。国内典型的单、双回路 500kV 紧凑型线路如图 10-1 所示。



(a)



(b)

图 10-1　国内典型的 500kV 紧凑型线路

（a）单回路；（b）双回路

二、导线分裂根数

紧凑型线路较常规线路增加了相导线的分裂根数，其中 220kV 紧凑型线路分裂根数不宜低于 4 根，330kV 不低于 4 根，500kV 不低于 6 根。

三、主要电气特性

紧凑型线路绝缘强度与常规线路相当，具有与常规线路基本相同的安全可靠性。与常规线路一样具备

[1] 这里常规型线路包括 220、330kV 及 500kV 三个电压等级输电线路，相导线布置采用水平或三角排列。其中 220kV 线路导线一般采用两分裂 240mm² 及 300mm² 导线；330kV 线路导线一般采用两分裂 400mm² 导线；500kV 线路一般采用 4 分裂 400mm² 导线。

带电作业条件；具有较小宽度的地面高场强区，以500kV线路为例，紧凑型线路地面场强高于4kV/m的宽度仅为16m，是常规线路宽度的1/3左右。具有良好的系统运行特性，紧凑型线路三相导线等边倒三角排列方式使得ABC三相参数的不平衡度很小；以500kV线路为例，紧凑型线路的序间耦合参数无论是有名值还是相对各自正序参数的标幺值，均在常规线路序间参数的9%以下，紧凑型线路比常规线路的对称性要好很多，一般不需要换位。

四、线路自然输送功率

紧凑型线路与常规线路相比具有较小的正序电抗和较高的自然输送功率。按国内紧凑型线路设计方案，220kV较常规线路提高自然功率约60%；330kV提高自然功率约40%；500kV提高自然功率约30%。

五、线路走廊宽度

与常规线路相比，紧凑型线路由于塔头结构的特殊布置形式，有效降低了输电线路走廊宽度。330kV紧凑型线路压缩走廊宽度7.8～16.8m，500kV紧凑型线路平均节省了走廊宽度约17.9m。在线路走廊拥挤的地区，紧凑型线路具有更好的经济效益和社会效益。

六、杆塔结构

为满足导线的特殊布置形式，紧凑型线路铁塔具有塔头尺寸大、结构形式相对复杂、节点多、杆件的受力传递过程曲折等特点。

第二节　导线选型及布置

一、相导线选型及布置

（一）相导线的布置方式选择

紧凑型线路三相导线一般采用三角形布置方式。常见的三角形布置形式见表10-1。工程塔头设计时应结合相间距离的选取对不同尺寸的正等边三角形、倒等边三角形、等腰三角形布置型式进行自然功率、导线表面最大场强、无线电干扰水平、可听噪声水平及电晕损耗等电气性能指标进行综合比选。

表10-1　相导线布置方式

名称	倒等边三角形	正等边三角形	倒等腰三角形
相导线布置方式	A, C（上，间距 a）；B（下）；边长 a、a	C（上）；A, B（下，间距 a）；边长 a、a	A, C（上，间距 a）；B（下）；边长 b、b

注　表中a、b值为相间距离取值。

一般来讲，倒等边三角形布置形式波阻抗小，自然功率高，等腰三角形布置形式波阻抗大，自然功率低；倒等边三角形布置方式最大地面场强位于线路中线下方，正等边三角形布置方式则位于线路中线外侧（一般为数米）；在山区，铁塔高度受边相导线控制，倒等边三角形边相导线相对较高，能有效减小塔高及树木砍伐量。

倒等边三角形在结构上便于三相导线布置在同一塔窗内，正等边三角形布置形式的下两相绝缘子串联结复杂，国内紧凑型线路三相导线一般采用等边倒三角形布置形式。

（二）导线选型

紧凑型线路采用多分裂导线，导线截面除满足电晕、无线电干扰和可听噪声的限值外，还要根据经济电流密度进行选择，同时也要通过技术经济比较（如年费用最小法），最后选定分裂导线的截面和分裂根数。

此外，为了平衡三相线路参数，充分利用导线截面和减小导线表面场强，紧凑型线路导线选型时，还应尽量做到每相电荷平衡，每根子导线电荷基本平衡。一般以工作电容来衡量每相导线电荷平衡情况，该工作电容乘以相电压等于该相单位长度线路电荷；用不均匀系数表示每根子导线电荷平衡情况，该系数等于该根子导线的实际电荷除以子导线的平均电荷。导线选型时，子导线最大电荷不均匀系数不宜大于1.05，最小电荷不均匀系数不宜小于0.95。相导线工作电容相差不宜超过0.25%。

二、相间距离

紧凑型线路导线相间距离的选取可按如下原则确定。

（一）工频及操作过电压间隙

档距中央所需的相间距离涉及导线因不同工况风速产生不同步摆动而互相接近后需要保持的最小电气距离，这个最小电气距离应按工频及操作冲击耐压强

度要求选取。海拔不超过1000m的地区，不同电压等级紧凑型线路档距中央所需的相间距离见表10-2。海拔超过1000m的地区，海拔每增高100m，操作过电压间隙值应较表中数值相应增大1%。

表10-2 操作过电压、工频电压导线相间最小间隙 m

标称电压（kV）	220		330		500	
校验位置	塔头	档中	塔头	档中	塔头	档中
操作过电压相间最小间隙	2.4	2.1	3.4	3.0	5.2	4.6
工频电压相间最小间隙	—	0.9	—	1.6	—	2.2

（二）相间距离

较大幅度地压缩相间距离，增加子导线根数，增大子导线分裂间距，可提高紧凑型线路的自然输送功率。海拔不超过1000m的地区，相导线中心距离不宜小于表10-3所列数值。

表10-3 相导线线间距离 m

标称电压（kV）	220	330	500
线间距离	3.4	4.8	6.7

（三）档距中央导线风偏摆动要求的相间距离

实际工程设计中，应考虑短路引起的电动力和风力作用下导线摇摆对线间距离的影响。根据系统短路电流、短路时间计算三相短路时，相导线不得发生碰线；按照工频电压及操作过电压工况风作用下导线不同步摆动，计算不同档距情况下档距中央导线风偏摆动时的相间距离。对于低于表10-2所列最小相间距离要求值的档，应加装相间绝缘间隔棒予以限制，相间间隔棒示意图如图10-3所示。根据已建紧凑型线路设计运行经验，可按表10-4要求安装相间间隔棒。

表10-4 导线相间间隔棒安装要求

设计覆冰10mm及以下		设计覆冰15mm	
档距L范围（m）	相间间隔棒安装个数（个）	档距L范围（m）	相间间隔棒安装个数（个）
$L<600$	0	$L<500$	0
$600\leq L<700$	1	$500\leq L<600$	1
$700\leq L<800$	2	$600\leq L<700$	2
$800\leq L<900$	3	$700\leq L<800$	3
$900\leq L^{*}<1000$	4	$800\leq L^{**}<900$	4

* 档距不宜大于1000m；

** 档距不宜大于900m。

线路通过舞动区时，应考虑由导线舞动引起的相间距离问题，紧凑型线路防舞设计可参见本手册第五章第六节电线防振与防舞设计有关内容。

第三节 绝缘配合及防雷接地

一、操作过电压水平

（一）我国电力系统关于操作过电压倍数的规定

GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》对线路相对地操作过电压水平的确定做如下规定：

对线路操作过电压绝缘设计起控制作用的空载线路合闸及单相重合闸过电压设计时，应符合下列要求：对范围Ⅱ线路（$252kV<U_m\leq800kV$）合闸和重合闸产生的相对地统计过电压，对330、500kV系统分别不宜大于2.2p.u.、2.0p.u.；对范围Ⅰ（$7.2kV\leq U_m\leq252kV$）系统计算用相对地最大操作过电压的标幺值，对220kV系统不大于3.0p.u.。范围Ⅱ空载线路合闸、单相重合闸过电压的主要限制措施应为断路器采用合闸电阻和装设MOA，也可使用选相合闸措施。

（二）相间操作过电压水平

DL/T 5217—2013《220kV～500kV紧凑型架空输电线路设计技术规定》条文说明中列出相间与相对地操作过电压的比值，220kV取1.4，330kV和500kV取1.7。考虑到220、330kV及500kV线路相对地操作过电压分别按3.0、2.2倍及2.0倍最高运行相电压（最大值）计算，我国220kV紧凑型线路相间统计操作过电压取最高运行相电压（最大值）的4.2倍；330kV紧凑型线路取3.74倍；500kV紧凑型线路取3.4倍。

二、相对地及相间塔头空气间隙

（一）相对地塔头空气间隙操作冲击50%放电电压水平

GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》规定，风偏后操作过电压下线路导线对杆塔空气间隙的正极性操作冲击电压50%放电电压$u_{l.s.s}$应符合式（10-1）的要求。

$$u_{1.s.s} \geqslant k_3 U_s \quad (10\text{-}1)$$

式中 U_s——范围Ⅱ线路相对地统计操作过电压，kV；

k_3——线路空气间隙操作过电压统计配合系数。输电线路采用V型绝缘子串配合系数可取1.27。

（二）相间塔头空气间隙操作冲击50%放电电压水平

根据GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》对变电站相间空气间隙的选取规定，变电站相间空气间隙的50%操作冲击放电电压$U_{s.s.p.p}$应按式（10-2）计算。

$$U_{s.s.p.p} = 1.7U_{s.p} / (1 - n\sigma_{s.p.p}) = k_{10}U_{s.p} \quad (10\text{-}2)$$

式中 $U_{s.p}$——避雷器操作冲击保护水平，kV；

k_{10}——相间空气间隙操作过电压配合系数；

n——变异系数的倍数，单一间隙时，取3；

$\sigma_{s.p.p}$——相间空气间隙操作过电压下放电电压的变异系数，取3.5%。

紧凑型线路的相间塔头空气间隙操作冲击50%放电电压水平不应低于上述计算值。

（三）塔头相对地及相间空气间隙距离

根据式（10-1）与式（10-2）计算出的相对地及相间塔头空气间隙操作冲击50%放电电压查相应的曲线即可得所需紧凑型塔头空气间隙的数值。具体方法可参见本手册第三章第八节操作过电压作用下塔头绝缘设计有关内容。

GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》及DL/T 5217—2013《220kV～500kV紧凑型架空输电线路设计技术规定》对各电压等级的紧凑型线路所需海拔不超过1000m地区塔头带电部分与杆塔构件间以及塔头相导线间的间隙距离做了规定：在相应风偏条件下，间隙值分别不应小于表10-2、表10-5所列数值。

表10-5 海拔1000m及以下地区紧凑型架空输电线路相对地的空气间隙 cm

系统标称电压（kV）	220	330	500
雷电过电压	190	230	330（330）
操作过电压	145	195	270（250）
持续运行电压	55	90	130（120）

注 括号内数据适用于海拔500m及以下地区。

海拔超过1000m的地区，220～500kV紧凑型架空输电线路操作过电压和工频电压的间隙，在表10-2、表10-5规定的数值的基础上按本手册第三章第八节绝缘配合设计的方法进行修正。如因高海拔而需增加绝缘子数量，则表10-5规定的雷电过电压间隙也应相应增大。

三、防雷及接地

紧凑型线路的防雷及接地设计主要方法及原则与常规220、330kV及500kV线路原则一致，可参见本手册第三章九节防雷保护与接地有关内容。本节仅对典型线路耐雷水平进行介绍以便于设计参照。

（一）反击耐雷水平

清华大学曾对国内运行的220kV紧凑型线路、500kV紧凑型线路以及常规500kV线路耐雷水平分别进行了计算，结果如下：

220kV紧凑型线路耐雷水平为97kA，雷击跳闸率为0.338次/（100km·a）。

500kV紧凑型线路耐雷水平为172kA，雷击跳闸率为0.07次/（100km·a）。

常规型线路耐雷水平为180kA。

通过相关研究、计算可以认为，同等条件下，500kV紧凑型线路的反击耐雷水平与常规型线路大体相当。

（二）绕击耐雷水平

通常紧凑型线路全线架设双地线，地线对边导线的保护角为负值。由于紧凑型线路导线特殊的布置形式，使得地线对导线的保护角较常规线路更小（一般为负保护角），其绕击跳闸率比常规线路低得多。因此，紧凑型线路在防止绕击事故方面具有明显优越性，尤其对山区线路，这一优势更为突出。

第四节 绝缘子串及金具

如前所述，为了最大限度地提高线路的自然功率，紧凑型线路悬垂直线塔三相导线通常布置在同一塔窗内，压缩了导线线间距离。为了限制悬垂绝缘子串的摆动，紧凑型线路直线杆塔一般采用V型绝缘子串的悬挂方式。

V型绝缘子串夹角按本手册第七章第二节绝缘子串的组装的计算式（7-5）进行选取。V型绝缘子串夹角的大小，对绝缘子串的受力情况影响较大。夹角太大，绝缘子串受力加大；夹角太小，在风荷载作用下，将使V型绝缘子串的一肢受压。因此设计时应考虑风荷载对绝缘子串摇摆的影响合理选择V型绝缘子串夹角，V型绝缘子串的两肢之间的夹角一半可比最大风偏角小5°～10°，或通过实验确定。采用复合绝缘子时端部应采取防脱落设计。

由于相导线采用紧凑布置，紧凑型线路下导线V型绝缘子串最大夹角较大，V型串抗垂直和纵向力的

能力差，为了使下导线V型串受力合理，在大负荷情况下，对下相导线采用V型和悬垂串相组合的方式（见图10-2），该种组合是超静定力学体系。为了避免出现超静定情况，在无风时要求V型串处于松弛状态，只有悬垂串承受垂直负荷。因此，V型串中需配置调节长度金具，调节的长度需考虑各种工况的导线联板位置偏移，在任何条件下只有一串绝缘子或两串绝缘子同时受力。

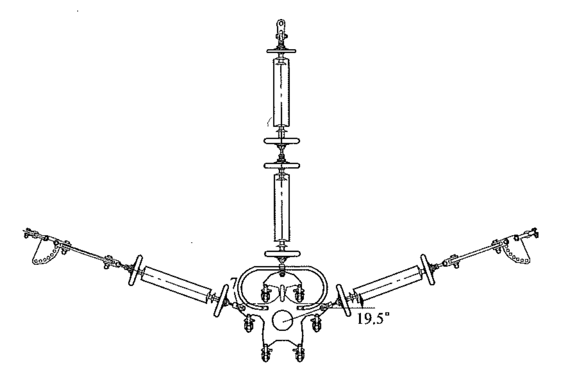


图10-2 下导线V型绝缘子串和悬垂串组合示意图

紧凑型线路绝缘子及金具的机械强度选定方法及要求与常规线路基本一致。可参照GB 50545—2010《110kV～750kV 架空输电线路设计规范》及 DL/T 5217—2013《220kV～500kV 紧凑型架空输电线路设计技术规定》有关规定。紧凑型线路金具的设计安全系数在最大使用荷载情况下不小于2.5，在断线、断联情况下不小于1.5。绝缘子机械强度的设计安全系数不应小于表10-6所列数值。

表10-6 绝缘子机械强度安全系数

项目	安全系数			
	最大使用荷载	断线	断联	常年荷载
盘型绝缘子	2.7	1.8	1.5	4.0
复合绝缘子	3.0	1.8	1.5	4.0

由于紧凑型线路导线的特殊布置形式，为防止大档距中央导线间因大风引起的不同期摇摆而造成相间闪络，需在水平两上相导线之间安装相间绝缘间隔棒，安装原则可参见本章第二节第二部分档距中央导线风偏摆动要求的相间距离相关内容。DL/T 5217—2013《220kV～500kV 紧凑型架空输电线路设计技术规定》规定：相间绝缘间隔棒应采用复合绝缘子，且拉伸破坏强度不低于100kN；初始后屈曲轴向压缩荷载不低于600N。同时，由于相间间隔棒是通过与子导线间隔棒的连接来实现的，连接处常年受力，且拉压交变，加之导线振动的影响，容易产生磨损，因此连接金具应具有耐磨和转动灵活的性能，并需采取防电火花的措施。紧凑型线路相间间隔示意图如图10-3所示。

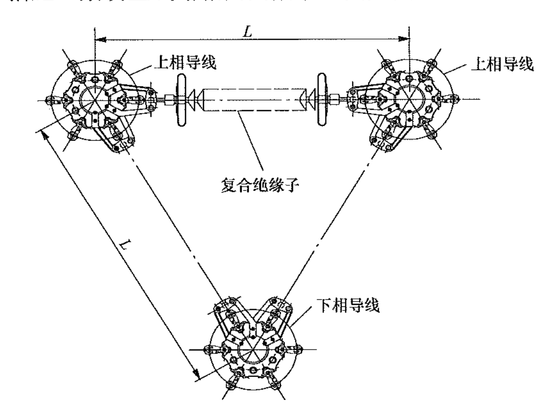


图10-3 紧凑型线路相间间隔棒示意图

第五节 铁塔设计

一、紧凑型线路的铁塔型式

为满足紧凑型线路导线布置、电气间隙及防雷接地等要求，通过对紧凑型线路铁塔大量的试验研究，并经过多条线路的设计及运行经验积累，逐步完善形成较为成熟的紧凑型铁塔结构型式。

单回路紧凑型线路铁塔结构型式，如图10-4、图10-5所示。

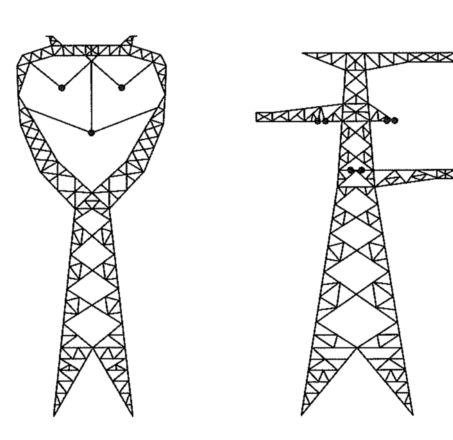


图10-4 单回路紧凑型悬垂直线塔　　图10-5 单回路紧凑型耐张塔

双回路紧凑型线路铁塔结构型式，如图10-6、图10-7所示。

二、铁塔的受力及构造特点

（一）铁塔的受力特点

紧凑型悬垂直线塔导线呈倒三角排列，上两相为V串，下相为V串带中吊串（档距较小的单回路直线塔，下相中吊串可取消）。

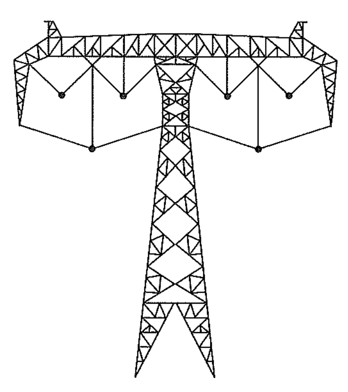


图 10-6 双回路紧凑型悬垂直线塔

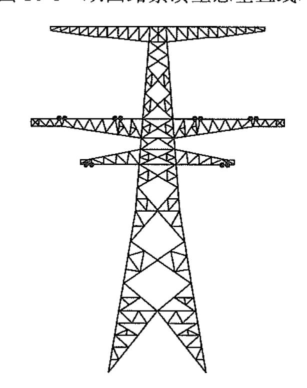


图 10-7 双回路紧凑型耐张塔

（1）V 串受力为静定结构状态，应注意绝缘子串为柔性构件，只考虑能承受拉力，不能承受压力。当 V 串中的某个串受力出现压力时，应考虑该串不再受力，该相导线的所有荷载由另一个串全部承担。

（2）下相 V 串带中吊串受力机理较为复杂，在设计中可在下相 V 串中加设调整板，当下相导线在只存在重力作用时，V 串保持松弛状态。

（3）当不存在纵向水平力时，如 90° 风工况，下相 3 个绝缘子串保持竖直状态，水平横向力和重力作用由 V 串左串和中吊串承担；如果风向为–90°，则荷载由 V 串右串和中吊串承担。

（4）当存在纵向水平力时，如事故工况，下相三个绝缘子串将在顺线路方向发生偏移。当下相 V 串由松弛状态偏移到被拉紧状态时，下相 V 串开始分担中吊串承担的荷载；随着偏移继续增大，中吊串承担的荷载逐渐减少，直至完全退出受力，呈松弛状态，此时，下相 V 串承担全部下导线荷载。

（5）只有当存在纵向水平力时，三个绝缘子串共同向一侧偏移，在某个偏移位置会出现三个绝缘子串共同受力的情况，由于此时三个绝缘子串经过旋转偏移，已不在一个平面内，因此可通过建立空间平衡方程组，解出各绝缘子串的受力情况。在设计中亦可将此问题简单化处理，对于下导线存在纵向水平力的工况，分别考虑中吊串或下 V 串各自承受下导线全部荷载，即可满足结构内力分析的要求。

紧凑型耐张塔的受力分析方式并无特殊的地方，在此不再赘述。

（二）铁塔的构造特点

（1）单回路紧凑型悬垂直线塔，三相导线均布置在塔窗内部，为此加大了塔窗尺寸，且塔头结构也更为曲折复杂。为满足铁塔受力要求，并保证塔头结构有足够的刚度抵抗受力变形，以满足各种工况下电气间隙的要求，各折弯处节点主材连接应采用外贴板、内包短角钢的连接方式。

（2）紧凑型悬垂直线塔横担中部设置三角形吊架。如图 10-8 所示，当导线存在纵向水平力作用时，吊架可在顺线路方向随导线旋转偏移，两吊架挂孔的连线即为吊架的旋转轴线。

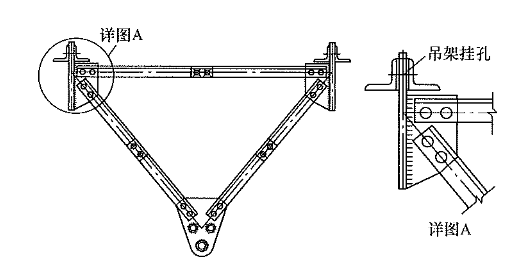


图 10-8 紧凑型直线塔吊架示意图

（3）为准确控制紧凑型悬垂直线塔导线挂点位置，在结构图中应详细标注导线挂线点坐标，如图 10-9 所示。

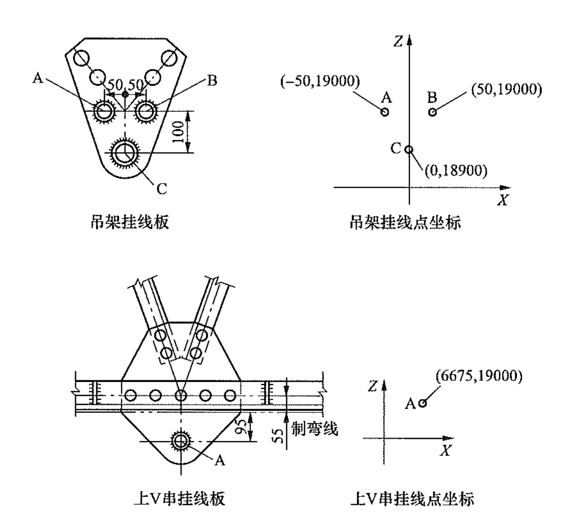


图 10-9 紧凑型直线塔挂线点坐标示意图

（4）双回路紧凑型塔横担悬臂较长，应增加横担底部高度，并通过节点位移计算选取适当的预拱值，以控制横担端部的竖直变形。

第十一章

重覆冰区线路

重覆冰区线路是输电线路的一部分，分为中冰区和重冰区线路，相对于轻冰区线路具有较多的特殊性。一是覆冰荷载大，成为设计中主要控制条件。在严重覆冰条件下存在因过载冰荷重而造成断线、倒塔等威胁；二是具有较明显的静、动态运行特性，如不均匀冰荷载、覆冰绝缘子串闪络、脱冰跳跃等特性；三是运行维护特别困难。所以，世界各国都慎重对待重覆冰区线路的设计和建设。本章从路径选择、覆冰气象条件、电气设计、荷载计算、重覆冰区塔型选择等方面介绍了重覆冰区线路设计。

第一节 路 径 选 择

一、重覆冰区地形特征

影响输电线路覆冰的因素很多，地形地貌是其中之一。暴露的地形或者水汽较充分的地区覆冰较严重，如分水岭、山脉走向与坡向、垭口与风口、较大水体等。

（1）分水岭。隔开相邻两个流域的山岭或高地，沿着斜坡两侧的降水注入不同的水系或河流。

在我国一些较大的山脉分隔了不同水系，其中秦岭是黄河水系和长江水系的分水岭，大别山是淮河水系和长江水系的分水岭，南岭是长江水系和珠江水系的分水岭，太行山是海河水系和汾河、黄河水系的分水岭。上述山脉对北方寒潮和南方水汽的阻挡，造成山脉两侧气候各不相同，成为气候的分界线。

四川盆地边缘的泥巴山，地处大相岭北侧，属大相岭山系，海拔在2500m左右，是青藏高原向成都平原的过渡地带。受地形的影响，形成了东西向气流通道，成为不同气候的分水岭，山脉东侧为潮湿阴冷的亚热带湿润气候，雨日多、晴天少，林高草密；山脉西侧受下沉气流影响形成了比较独特的晴朗干暖的大陆气候，云量少，晴天多，日照时间较长，气温较高。冬季翻越泥巴山垭口一带的气流受地形挤压作用，雾气迷漫，气温低，在风力作用下，导线覆冰现象十分严重。对比泥巴山坳和其他地形的导线覆冰观测数据，结果表明，标准冰厚比值为1:0.65～1:0.92。

（2）山脉走向与坡向。

迎风坡就是阻挡风向的山坡，反之则为背风坡。暖湿气流推进时，遇到山坡阻挡，开始爬升，水汽遇冷凝结形成降水，通常迎风坡降水较多，背风坡降水较少，如图11-1所示。

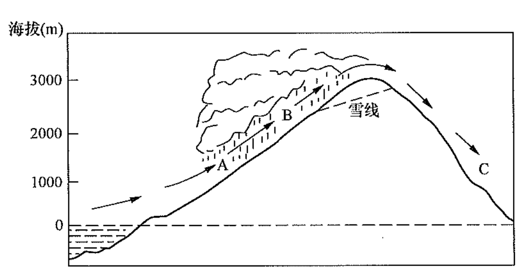


图11-1　迎风坡与背风坡雪线的海拔差异示意图

在冬季，山脉的迎风坡降水多，易积雪，覆冰较重。背风坡降水相对较少，积雪少，相对覆冰较轻。在泥巴山、大娄山、大凉山、雪峰山等地的观冰点对迎风坡和背风坡导线覆冰对比观测表明，在大致相同的海拔上迎风坡与背风坡的标准冰厚比值是1:0.4～1:0.9。

（3）垭口和风口。

位于连续山梁上相对较低的一块平坦位置称为垭口，可以是山的顶峰，也可以是山峰与山峰相接的地点。谷地伸入山地，成为风口，风在风口受到峡谷的狭管作用影响，速度加快。

以西南地区观冰站观测资料为例，二郎山垭口与其他地形导线覆冰冰厚比值在1:0.3～1:0.56，大凉山天喜梁子风口和与其他地形导线覆冰冰厚比值在1:0.43～1:0.78。

（4）湖泊、水库等水体。

水体对邻近陆地的影响，主要是通过两者增温不同和水汽含量不等，使邻近的小气候发生变化的。影响的范围与水体的大小、深度及陆地地貌等相关，距水体越近，影响越大。

位于昆明东南部的梁王山，海拔约 2700m，两面临湖，水汽充足，每年冬季水汽上升在山顶形成云雾，以致经常发生覆冰现象。

二、重覆冰区线路的路径选择原则

重覆冰区线路路径方案的选择，原则上应综合考虑各方案的覆冰情况、地形、交通维护条件、路径长度、事故后果等因素经技术经济比较后确定。但鉴于目前各地区对冰凌资料的掌握和对冰害特性的认识还不够，难以保证重覆冰区线路的安全运行，因此在工程前期可研路径规划阶段，应结合线路走向，尽量避开严重覆冰区或者在严重覆冰区内做到“避重就轻”。根据以往的重覆冰区设计经验，线路覆冰与其所处地形、高程、附近的地形地物、覆冰时风速风向等因素密切相关，因此线路应尽量避开暴露的山顶、避免横跨垭口、风道等容易形成严重覆冰的微地形区段。

（1）避开调查确定的覆冰严重地段和污秽较重区域。

已有的重覆冰区线路运行经验表明，位于严重覆冰地段的输电线路，不但工程造价高，而且由于缺乏冰凌资料，设计所估算的冰厚条件很难完全符合现场的实际情况，易发生破坏性冰害事故，给线路运行带来巨大安全隐患。所以，在确定路径走向时，应尽量避让严重覆冰地段。

重覆冰重污秽地区的输电线路，除常温条件下会出现污闪事故外，在覆冰季节更会因覆冰绝缘子串绝缘强度下降而出现冰闪事故。目前，防止冰闪的有效措施主要是增加绝缘子串长度，即降低工作电压下沿冰面闪络时的耐压梯度，这将直接影响杆塔的塔头尺寸，因此在设计中对这类地区也应尽量避开。

（2）避免大档距、大高差和大、小档。

线路应尽量沿起伏较小的地形走线。重覆冰区线路的档距不宜太大，同时要求各档间尽量均匀，避免大小档情况，以减少纵向不平衡张力。另外也应尽量减小各相邻档的高差，以避免脱冰跳跃和不均匀覆冰时引起悬垂绝缘子串上翻，碰坏绝缘子和出现永久性接地故障。

由于大档距和大高差档的导线及地线悬挂点应力较高，不平衡张力大，容易出现过载性断股、断线事故，因此在重覆冰区线路设计过程中应尽量避免。若无法避免时，应注意限制档距和高差，并根据档距高差的实际情况进行导线及地线的不平衡张力验算。

（3）避免横跨垭口、风道和通过湖泊、水库等容易覆冰的地带。

根据已有工程的运行经验，凡属垭口、风道等处，受气流抬升和风速增大的影响，覆冰比其他地段显著增大，常常引起冰害事故。如湖南 110kV 拓湘线 219 号～220 号档横跨垭口，该档档距为 309m，距 219 号杆 60～180m 一段线路刚好处在垭口所形成的风道中，1964 年 2 月线路覆冰时，处于风道中的导线上冰凌荷载达 115N/m，而在风道两侧的导线上仅有薄冰。因此，线路路径应尽量避免横跨垭口、风道和通过湖泊、水库等容易覆冰的地带。

此外，从现有观冰资料中可以看到，山区输电线路在同一大气覆冰条件下，各点因受地形因素影响，其覆冰量差别很大。如四川黄茅埂观冰站、点在 1985～1986 年冬大冰凌时期就出现了重覆冰，各站、点的实测资料见表 11-1。

表 11-1　1985～1986 年四川黄茅埂观冰站、点实测覆冰量

站点名称	黄茅埂站	老林口点	五指山点	七里坝点
相对位置	主站	主站东偏南 23km	主站东偏北 71km	主站西南 95km
海拔高程（m）	2835	2100	1500	3100
覆冰量（N/m）	31.1	246.0	55.0	11.4

表 11-2 给出了二郎山观冰站的实测覆冰量数据，从表中可以看出，覆冰量与冬季主要覆冰气流的相对关系非常密切，所谓地形因数影响，大多数情况下可归于对主要覆冰气流的影响。

表 11-2　二郎山观冰站实测覆冰量　N/m

站点情况 / 覆冰量 / 年份	二郎山垭口站海拔 2987m，始终处于冬季主覆冰气流中	背风坡站海拔 2830m，垭口西 1.4km 处，处于主覆冰气流下降途中
2002	154.80	55.20
2003	147.20	56.00
2004	128.00	63.60
2005	120.40	93.20
2006	132.00	86.00

（4）通过山岭地带，宜沿覆冰时的背风坡或山体阳坡走线。

输电线路通过山岭地带宜沿覆冰时的背风坡走线，因为在冻雾型覆冰过程中，地形对覆冰有很大影响。运行经验表明，严重覆冰多出现在冻结高度（覆冰时期云雾底部）以上，并处于抬升气流的迎风坡地带，在山的背风坡对过冷却水滴和覆冰风速均有明显的屏蔽作用。阳坡日照充分，气温比同一高度的阴坡

高，覆冰相对较轻。

（5）限制耐张段长度。

为了减小耐张段内导线及地线因覆冰或不同期脱冰所产生的不平衡张力，限制冰害事故的影响范围，便于运行维护和事故抢修，宜限制中、重冰区线路耐张段长度。GB 50545—2010《110kV～750kV 架空输电线路设计规范》、GB 50665—2011《1000kV 架空输电线路设计规范》和 GB 50790—2013《±800kV 直流架空输电线路设计规范》等规范均规定：“中、重冰区的耐张段长度分别不宜大于 5km 和 3km。当耐张段长度较长时应采取防串倒措施。在高差或档距相差悬殊的山区或重冰区等运行条件较差地段，耐张段长度应适当缩短。”

（6）限制耐张塔的转角角度。

鉴于重冰区线路荷载大，在运行中还会出现较严重的冰凌过载情况，杆塔角度荷载随转角增加而显著增大，容易导致大转角杆塔的损坏。贵州 500kV 贵福线，2008 年 1～2 月，多基 JG22（30°～60°）20mm 重冰区转角塔（线路转角 40°左右）因覆冰过重，发生铁塔严重损坏或倒塔事故。因此重覆冰线路转角度数不宜过大，以增加耐张转角杆塔抗过载能力。

（7）重要交叉跨越宜避开重冰区。

为防止对重要跨越发生较大的公共安全和电网安全事件，不宜在重冰区跨越高速铁路、高速公路、重要输电通道架空线路。

第二节 覆冰气象条件

本节主要给出重覆冰地区覆冰气象条件的选择，其他气象条件的确定见第五章。

一、覆冰调查

我国实测覆冰资料较少，可以根据当地覆冰的定性情况和定量资料，通过沿线地形、气候特征与当地气象资料综合分析，估算沿线标准冰厚。覆冰调查原则如下：

（1）覆冰调查范围。

覆冰调查范围应为工程所在地（点）附近地区。调查点应选紧靠工程所在地（点）或与工程所在地（点）地形相似的村镇居民点、工厂、矿山、高山建筑物管理处。重冰区线路宜 1～2km 布设一个调查点，对微地形（风口、垭口、分水岭、突出山顶、迎风坡、水体等）影响严重段应加密调查点；轻、中冰区线路宜 3～5km 布设一个调查点，调查点应标识在线路路径图上。

（2）覆冰调查对象。

覆冰调查对象主要是电力、通信、交通等部门的运行、管理、维护人员及当地知情人，特别是高山电视台、微波站、气象站、观冰站和道班的冬季值班者。

（3）覆冰调查内容。

在覆冰调查过程中，应重点收集、调查如下内容和数据。

1）覆冰地点、海拔、地形，覆冰附着物种类、型号及直径、离地高度、走向。

2）覆冰发生时间和持续日数，当时的天气情况，包括气温、湿度、风向、风力、下雨、下雪、起雾等。

3）覆冰种类。覆冰种类可根据实际情况分析判断，也可按照表 11-3 确定。

4）覆冰的形状、长直径、短直径和冰重。

5）覆冰重现期，包括历史上大覆冰出现的次数和时间，以及冰害情况。

表 11-3 覆冰分类表

项目	雨凇	雾凇		雨雾凇混合冻结	湿雪
		粒状	晶状		
气温（℃）	0.0～−3.0	低于−3.0	低于−8.0	−1.0～−9.0	−1.0～−3.0
降水类别	小雨、毛毛雨或雾	雾或毛毛雨	雾	有雾、毛毛雨或小雪	雪或雨夹雪
视感	透明或半透明、密实、无孔隙	粗颗粒、不透明	细粒、不透明	成层或不成层，似毛玻璃，较密实，基本无孔隙	白色不透明
手感	坚硬、光滑、湿润	脆、较湿润	松、脆、干燥	较坚硬、较湿润	较松散、较湿润
形状色泽	椭圆形、光滑似玻璃	椭圆形、白色	针状、纯白色	椭圆形、不光滑	圆形、白色
附着力	牢固	较牢固	轻微振动就容易脱落	较牢固	易被风吹掉

（4）覆冰收资内容。

针对覆冰区的覆冰资料收集主要包括以下内容。

1）已建输电线路的设计冰厚，投运时间，运行中的实测、目测覆冰资料，以及冰害事故记录、报告，包括冰厚、冰重、杆（塔）型、杆（塔）高、线径、档距和事故后的修复标准。

2）邮电通信线路的设计冰厚、线径、杆高和运行情况，以及冬季打冰措施、实测覆冰围长和厚度。

3）高山气象站、电视塔、微波站、道班的冰害事故记录和报告。

4）气象台站实测覆冰资料和覆冰的起止时间与同时气象条件，以及天气系统过程。

（5）对于风口、垭口、分水岭、山顶突出处、迎风坡等特殊地区，应做微地形、微气候调查和实地踏勘，了解对覆冰增大的影响。

二、覆冰观测

覆冰观测是获取覆冰基础资料的手段之一。我国气象部门仅有少数气象站有部分覆冰观测记录，但这些数据多是在离地 2m 高、长 1m、直径 4mm 的铁线上观测的，受地形地物影响大，不能满足输电线路的设计需求。因此，电力设计和运行单位通过在规划的输电线路走廊区域，按地形分区和气候分区，选择有代表性的地点，设立相对固定的观测站点，进行导线覆冰观测；辅之以走廊区域历史冰害调查与大覆冰期实地踏勘巡测，为判断走廊区域内不同地形与气候区域的覆冰特征及其分布规律提供准确的基础资料。

覆冰观测有观冰站（点）的覆冰观测、试验线路的覆冰观测、冰灾线路的覆冰观测及气象要素观测等 4 类。

1. 观冰站（点）的覆冰观测

观冰站是区域性测站，观测数据是为长期积累区域覆冰基础数据，满足覆冰研究或直接为输电线路工程冰区计算服务的。观测数据代表一个地理气候类似的较大区域覆冰特性的一般情况，观测设施与项目齐全，观测年限较长。

观冰点观测数据是为输电线路冰区计算或为区域覆冰特性研究服务的，一般是对输电线路规划走廊局部区段或微地形点的覆冰观测，观测数据代表一个特定的局部区域或地段，能在短期内为工程设计提供较多的、与观冰站同步的覆冰数据。

（1）观冰站（点）的选址原则。

高电压等级的输电线路一般距离较长，穿越气象条件恶劣的严重覆冰区域的概率相对较大。根据我国重冰区线路建设的经验，重冰区一般分布在山地或丘陵地区。由于山区地形复杂，规划线路走廊可能出现变动，观冰站观测场位置的选址十分关键，观测场选址的合理与否，直接影响到观测资料对工程的代表性与适用性。在观冰站（点）的选址过程中应遵循以下原则。

1）经覆冰区域气候分析、踏勘调查和收资分析，判断为重冰区的地段。

2）短期站点应位于输电线路走廊内，长期站点应位于输电线路走廊附近，对线路具有代表性。

3）观冰站观测场应平坦空旷，气流不受地物及林木的影响。观冰点应选在有代表性的一般地形和典型地点，如山顶、山腰、风口、垭口、迎风坡等。有条件的地方还可在一个山岭的两侧分设几个站点，进行不同海拔、不同地形条件的同步观测。

（2）观冰站（点）主要设施设备。

观冰站应设立雨凇塔及地面气象观测场，并应配置相应覆冰及气象观测的仪器设备。观冰点应设立雨凇架，并应配备可移动式气象观测仪。

（3）覆冰观测内容。

覆冰观测内容主要为覆冰过程极值及相关气象要素连续观测，包括以下几部分内容。

1）覆冰种类、长径与短径、截面形状与面积、每米冰重，覆冰过程起止时间与测冰时间。

2）导线覆冰气象要素包括干、湿球气温，相对湿度，气压，水汽压，降水量，风速风向，日照，雪深，天气现象。观冰点可仅观测同时气温、风速风向、雪深、天气现象。

3）对比观测导线覆冰与周围地物如通信光缆、拉线、树枝的覆冰。

2. 试验线路的覆冰观测

建立模拟试验线路，进行覆冰观测的目的是为重冰区线路设计提供尽可能实际的线路覆冰状况下铁塔、导地线、金具的受力情况，以及导地线覆冰后弧垂变化，覆冰舞动、振动、脱冰跳跃轨迹，绝缘子悬垂串偏移等资料，为线路重冰区段的铁塔设计、导地线选择等积累资料，作为设计依据。

（1）试验线路场地选择要求。

1）试验线路应设置于实际拟建设线路工程经过的重冰区段附近，选择的场地应有冰可观，并应位于拟建线路覆冰严重的区域；

2）架设试验线路的场地应开阔，线路走向应垂直于覆冰期的主导风向；

3）在垂直于线路方向前后应无地形或障碍物阻挡。

（2）模拟试验线路的建设要求。

1）应按实际拟建线路的设计情况选择相应试验线路的铁塔、基础、导地线、金具等。

2）试验线路应有两个及以上档距的耐张段，布置形式应至少为耐-直-耐，每个档距宜在 450m 以内；导线对地距离以不影响脱冰跳跃时导线的运动轨迹为原则，导线对地距离宜大于正常线路 3m；相间距离应按线路相应冰区、电压等级的规定取值。

3）为避免同档内各相导线的相互屏蔽影响，导线弧垂弧度应有适当差别。

（3）试验线路的覆冰观测内容。

1）记录开始观测时的温度、风向和风速、导线弧垂、铁塔挠度、悬垂串偏移值、时间等；

2）应根据观测系统设置的间隔时间，同期进行温度、风向和风速的测量并记录；

3）当现场观察发现有异常情况时，应拍摄记录导地线微风振动和脱冰跳跃轨迹；

4）当覆冰处于保持期，气温、风速较稳定时，在线路各档距侧的固定位置，采用红外测距仪或激光测距仪测量记录导地线弧垂下降、挠度、偏移值，同时应人工采集导线单位长度的覆冰，经过折算后，分别与导线悬链线等公式计算的应力、弧垂值、挠度、偏移值进行比较并记录。

3. 冰灾线路覆冰观测

为准确分析和掌握输电线路发生冰灾事故的原因，应对事故区域进行覆冰相关数据的收集和测量。

观测内容包括导线、拉线、塔材、树枝及其他物体上的覆冰要素，并判别覆冰性质。覆冰观测要素包括长径、短径、冰重、围长、截面积等，同时测量覆冰附着物的截面积及离地高度。观测同时气象要素包括气温、湿度、风向和风速、积雪深度、能见度、天气现象。拍摄受损线路覆冰及杆塔不同高度的覆冰状况、线路舞动和脱冰跳跃、散落在地面的残冰及未消融的冰雪实况、树枝等其他物体上的覆冰。必要时，根据冰灾线路重建需要，可设立短期观冰点，观测覆冰数据。

4. 气象要素观测

为准确掌握测点及周围一定范围内的平均气象状况，采用人工观测和自动观测方式对覆冰相关的气象要素进行观测记录，观测项目主要包括气温、湿度、风向和风速、降水量、能见度、日照、气压、雪深、天气现象等。

三、覆冰计算方法

1. 标准冰厚计算

标准冰厚计算可根据实测或覆冰调查资料，选用下列公式计算。

（1）根据实测冰重计算标准冰厚

$$B_0=\left(\frac{G}{0.9\pi L}+r^2\right)^{0.5}-r \qquad (11\text{-}1)$$

式中 B_0——标准冰厚，mm；

G——冰重，g；

r——覆冰附着物半径，mm；

L——覆冰体长度，m。

（2）根据实测覆冰长、短径计算标准冰厚

$$B_0=\left[\frac{\rho}{3.6}(ab-4r^2)+r^2\right]^{0.5}-r \qquad (11\text{-}2)$$

式中 ρ——覆冰密度，g/cm³；

a——覆冰长径（包括覆冰附着物），mm；

b——覆冰短径（包括覆冰附着物），mm。

（3）根据调查或实测覆冰直径计算标准冰厚

$$B_0=\left[\frac{\rho}{0.9}\times(k_sR^2-r^2)+r^2\right]^{0.5}-r \qquad (11\text{-}3)$$

式中 R——覆冰半径（包括覆冰附着物），mm；

k_s——覆冰形状系数，覆冰短径与覆冰长径的比值。

导线覆冰形状系数应由当地实测覆冰资料计算分析确定，无实测资料地区可参照表 11-4 选用。

表 11-4 覆冰形状系数

覆冰种类	覆冰附着物名称	覆冰形状系数 k_s
雨凇、雾凇、雨雾凇混合冻结	电力线、通信线	0.80～0.90
	树枝、杆件	0.30～0.70
湿雪	电力线、通信线、树枝、杆件	0.80～0.95

注 轻覆冰 k_s 靠下限选用，重覆冰 k_s 靠上限选用。

2. 设计冰厚计算

在进行设计冰厚的计算时，应根据工程实际情况，结合覆冰影响因素、区域覆冰特征及资料情况进行。

（1）有实测覆冰资料时，可采用单导线设计冰厚计算公式计算。

$$B=K_hK_TK_\varphi K_dK_fK_JB_0 \qquad (11\text{-}4)$$

式中 B——设计冰厚，mm；

K_h——高度换算系数，mm；

K_T——重现期换算系数；

K_φ——线径换算系数；

K_f——线路走向换算系数；

K_d——地形换算系数；

K_J——档距换算系数；

B_0——标准冰厚，mm。

式（11-4）中的各项换算系数应由实测覆冰资料计算分析确定。

（2）设计冰厚简化计算公式可选用式（11-5）。

$$B=K_hK_TK_\varphi K_dB_0 \qquad (11\text{-}5)$$

式（11-5）中各修正系数由实测覆冰资料计算分析确定，无实测覆冰资料的地区，按以下方法确定或按所给经验系数选用。

1）高度换算系数为

$$K_h=\left(\frac{Z}{Z_0}\right)^{\alpha_1} \qquad (11\text{-}6)$$

式中 Z——设计导线离地高度，m；

Z_0——实测或调查覆冰附着物高度，m；

α_1 ——指数。

α_1 应由实测覆冰资料计算分析确定，应由实测覆冰资料计算分析确定，无实测覆冰资料地区：当 $Z \leqslant 10m$ 时，取 0.17，当 $10m < Z \leqslant 20m$ 时，α_1 可取 0.14。

2）重现期换算系数。调查最大覆冰厚度的估算重现期与设计重现期不同时，可按照表 11-5 重现期换算系数 K_T 修正。

表 11-5 重现期换算系数表 年

设计重现期	调查重现期							
	100	50	30	20	15	10	5	2
100	1.00	1.10	1.16	1.28	1.32	1.43	1.75	2.42
50	0.91	1.00	1.10	1.16	1.23	1.30	1.60	2.20
30	0.86	0.94	1.00	1.10	1.15	1.25	1.50	2.10

3）线径换算系数。线径换算系数应根据实测资料分析确定，无实测资料地区可参照式（11-7）计算。

$$K_\phi = 1 - 0.14\ln(d/d_0) \tag{11-7}$$

式中 d ——设计导线直径，mm，$d \leqslant 40mm$；

d_0 ——覆冰导线直径，mm。

4）地形换算系数。不同地形的换算系数应根据实测资料分析确定，无实测资料地区应在加强调查分析与借鉴的基础上，参照表 11-6 的经验系数选用。

表 11-6 地形修正系数

地形类别	修正系数
一般地形	1.0
风口或风道	2.0～3.0
迎风坡	1.2～2.0
山岭	1.0～2.0
背风坡	0.5～1.0
山麓	0.5～1.0
山间平坝	0.7

四、冰区划分

1. 冰区划分原则

同一冰区的划分原则应如下：

1）属同一气候区，海拔相当；

2）地形类似；

3）线路走向大体一致；

4）覆冰特性参数基本相等。

2. 冰区划分依据

1）覆冰成因及影响覆冰的气象条件分析结果；

2）沿线各调查点设计冰厚的分析计算结果；

3）区域气象站、观冰站覆冰分析计算结果；

4）沿线地形、海拔及植被分类结果；

5）沿线相邻区域已建输电线路设计冰区及运行资料；

6）邻近地区冰雪灾害记录或报告。

3. 冰区划分方法

根据冰区划分原则和输电线路路径，首先应考虑区域性气候特点，再根据输电线路沿线的实测和收资调查覆冰成果，结合附近已建输电线路设计运行情况，重点考虑微地形覆冰气候影响，按一般地区和微地形地区进行逐段冰区划分，提出冰区划分成果。

冰区划分成果应图表化，对特殊重冰区应说明划分的主要理由（支撑依据和运行维护难度等）。施工图设计阶段应实地落实冰区分界塔的位置，加强对微地形地段的踏勘调查，必要时提出加强抗冰措施建议。

第三节 电气设计

一、重覆冰区导地线选型

1. 导线选型

重冰区线路导线在电气和机械性能两方面的要求都较轻冰区更为严格。由于海拔高，超高压及特高压线路导线电晕、可听噪声和无线电干扰等电磁环境问题尤为突出。加大导线截面和增加其分裂数固然可以解决电晕引起的这些问题，但同时增加了铁塔的荷载，相应增加了工程造价，并不经济。

重覆冰线路易发生过载冰和不均匀冰引发的断线、断股事故，危及线路的安全运行。运行经验表明，由于覆冰荷载大，导线张力很高，因此，重覆冰线路导地线要具有优良的机械特性。

导线截面除按经济电流密度选择外，还要按电晕、无线电干扰和可听噪声等条件进行校验，另外还要根据年费用最小法进行经济分析。在进行充分的技术经济比较后，推荐出满足技术要求而且经济合理的导线截面和分裂型式。

综上所述，重覆冰区线路导线选择主要考虑以下几点：

1）满足系统输送容量要求，不能制约整条线路的传输能力。

2）满足电晕、无线电干扰和可听噪声等电磁环境要求。

3）满足重冰荷载对机械性能和过载能力要求，铝股在冰荷载下的安全系数要高，防止重冰区线路过载断股。对 30mm 及以上冰区宜选用铝合金导线。

4）弧垂特性好，以降低杆塔高度和数量、提高经济性。

2. 地线选型

重覆冰区线路的架空地线首先必须具有足够的过载能力，以免因断线而影响线路的可靠运行，设计荷载时，地线安全系数应大于导线安全系数。其次，在不过多增大地线支架高度的情况下，满足导地线在档距中央的安全间距，即满足不均匀覆冰时，导地线静态接近能耐受操作过电压的要求。导线脱冰跳跃或覆冰舞动时，导地线动态接近距离满足最大运行电压的要求，以免在不均匀覆冰或不同期脱冰时，导地线在档距中的相互接近，造成碰线闪络甚至烧伤（断）地线事故。最后，还需满足在接地短路时，短路电流流过架空地线的热稳定要求。

二、重覆冰区绝缘子片数选择

重覆冰地区交、直流线路在进行绝缘配置时，首先应根据输电线路实际的污秽等级，按爬电比距法或污耐压法选择污秽要求的绝缘子片数，然后按工频过电压（额定工作电压）、操作过电压和雷电过电压等条件进行校核，以满足线路在工频过电压（额定工作电压）、操作过电压和雷电过电压等各种条件下安全可靠的运行，具体方法详见本手册第三章第八节及第四章第七节的有关部分。除此之外，重冰区输电线路还需要按覆冰耐压对绝缘子片数进行校验。

输电线路由于覆冰造成绝缘子串绝缘强度下降而发生的击穿、闪络称为冰闪，是污闪的一种特殊形式。严重覆冰情况下，导线绝缘子串中各绝缘子片之间会出现冰凌桥接，使绝缘子串的泄漏距离缩短、绝缘强度降低，在闪络过程中，持续电弧可能烧伤绝缘子，造成绝缘子绝缘强度的永久下降。

1. 覆冰绝缘子的耐压

影响绝缘子覆冰闪络电压的因素较多，包括覆冰类型、覆冰厚度、冰水电导率、绝缘子串悬挂方式等。不同覆冰类型，其冰闪特性也有所不同，已有的试验结果和运行经验表明，在其他条件基本一样的情况下，覆冰类型为雨凇的绝缘子串的闪络电压相对最低。从国内线路的冰闪调查情况看，发生冰闪的线路覆冰类型绝大部分为雨凇和混合凇。

各个研究机构的试验结果表明，覆冰量会影响绝缘子冰闪电压。覆冰量越多，覆冰厚度越大，冰闪电压越低。随着覆冰厚度的增加，绝缘子冰闪电压呈下降趋势，但当覆冰厚度达到一定程度时，闪络电压则趋于饱和。加拿大的试验数据表明，当覆冰厚度大于20mm时，冰闪电压趋于饱和。

绝缘子覆冰闪络试验中，冰水电导率的大小对试验结果影响很大。覆冰绝缘子串耐压与冰水导电率的关系见表 11-7。根据对交流电压下 6 片 IEEE 标准绝缘子，监测线覆冰厚 20mm 时的覆冰电气特性实验研究数据，当冰水导电率小于 150μS/cm 时，覆冰绝缘子的耐压可用式（11-8）表示。

$$U_w = 165.3\sigma^{-0.18} \tag{11-8}$$

式中 σ——冰水导电率，μS/cm；

U_w——覆冰绝缘子的耐压梯度，kV/m。

表 11-7 覆冰绝缘子串耐压与冰水导电率的关系

冰水导电率（μS/cm）	10	20	50	80	100	150
耐受电压（kV/m）	109.2	96.4	81.7	75.1	72.2	63.7

直流输电线路覆冰绝缘子的耐压值若无实验资料，在海拔 1000m 及以下地区，当冰水导电率小于 150 μS/cm 时，可按式（11-9）计算。

$$U_w = 155S^{-0.18} \tag{11-9}$$

式中 S——冰水导电率，μs/cm。

在相同覆冰情况下，同样的绝缘子串长度、不同悬挂类型的绝缘子串，其冰闪电压是不相同的。在相同试验环境条件下，V 形绝缘子串和耐张绝缘子串的冰闪电压要明显高于 I 形绝缘子串的冰闪电压。中国电力科学研究院开展的交流绝缘子串的覆冰闪络试验的结果表明，V 形绝缘子串的冰闪电压是 I 形绝缘子串的 1.23 倍。

2. 绝缘子片数选择

根据实际线路的污秽等级，重覆冰线路按爬电比距法或污耐压法选择污秽要求的绝缘子片数，再按式（11-10）校验覆冰耐压下的绝缘子片数。

$$N_b = \frac{U_m}{K_H U_w h} \tag{11-10}$$

式中 N_b——覆冰耐压下的绝缘子片数；

U_m——系统最高运行电压，kV；

h——单片绝缘子的高度，m；

K_H——海拔为 H 米处的修正系数。

3. 海拔修正

根据清华、重庆大学等对低气压下绝缘子串放电特性的研究认为，高海拔地区气温的下降会使放电电压有所提高，但气压和绝对湿度的下降又会使放电电压降低，综合三个大气参数后总的效应是放电电压随海拔增加而下降，其关系由式（11-11）表示。

$$U_H = U_o\left(\frac{P_H}{P_o}\right)^n \tag{11-11}$$

式中 U_o——标准大气压下的冰闪电压，kV；

U_H——海拔 Hm 处的冰闪电压，kV；

P_o——标准大气压 101.325kPa；

P_H——海拔 Hm 处的气压，kPa；

n——特征指数，交流用特征值可参见表 11-8，直流用特征值见表 11-9。

表 11-8　交流输电线路用特征值表

研究单位名称	特征指数 n	推荐特征指数值
清华大学	0.39～0.47	0.44
重庆大学	0.62～0.88	0.70

表 11-9　重庆大学实验得出的直流线路不同绝缘子特征值表

编号	极性	绝缘子型号	特征值
1	DC+	XZP-210	0.62
2		LXP-160	0.64
3		FXBW-110/100	0.61
4	DC-	XZP-210	0.59
5		LXP-160	0.52
6		LXZP-210	0.55
7		XZWP-160	0.70
8		FXBW-110/100	0.60
9		FXBW-±800/210A	0.49
10		FXBW-±800/210B	0.47
11		FXBW-±800/400A	0.72

三、重覆冰区绝缘子串和金具选型

重覆冰区输电线路的导地线荷载较大，因此，在设计重覆冰区输电线路绝缘子串型式时，应尽可能选用高强度（机电破坏负荷等级较高）的绝缘子，以减少绝缘子串联数、简化绝缘子串型式。

1. 重冰区悬垂绝缘子串设计

重冰区悬垂绝缘子串的额定机械强度选择及联结选择等常规设计方法详见第七章第二节的相关内容。除此之外，为避免重冰区输电线路受覆冰不均匀性的影响，发生影响线路安全运行的情况，还应采用以下方式。

（1）双联悬垂绝缘子串应采用单挂点的悬挂方式。

（2）双联悬垂绝缘子串应由传统的顺线路方向布置方式改为垂直线路方向布置，挂点通过二联板和直角挂板与分裂导线联板连接，形成一个整体，避免双联悬垂绝缘子串顺线路布置时发生绝缘子串偏移后一联卸载的情况，典型联结方式参见图 11-2。

（3）在脱冰跳跃或舞动情况下，重冰区线路悬垂绝缘子串不同联之间应保证足够的联间距离，以免发生局部放电和碰撞，避免双联悬垂串的绝缘子由于相互碰撞而发生的“卡住”现象。

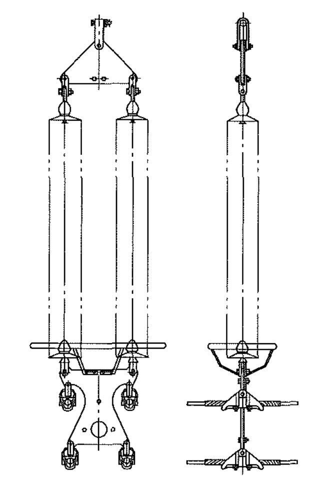


图 11-2　重冰区双联四分裂悬垂绝缘子串示意图

2. 重冰区耐张串设计

重冰区耐张绝缘子串的额定机械强度选择及联结选择等常规设计方法详见第七章第二节的相关内容。除此之外，还应注意以下几方面。

（1）各耐张绝缘子串挂线点金具应耐磨损和耐疲劳，以避免导线产生跳跃或舞动等动态情况时对挂线点金具造成破坏。

（2）耐张绝缘子串各联宜分别固定在杆塔上，以提高挂线点的可靠度，并且，此种联结方式的绝缘子串自身结构简单，可降低耐张绝缘子串的造价，典型耐张绝缘子串组装图参见图 11-3。

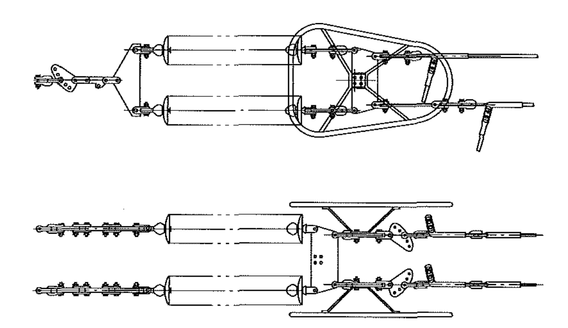


图 11-3　重冰区四联四分裂耐张绝缘子串示意图

（3）耐张绝缘子串应保证足够的联间距离，以保证在耐张塔出现最大转角，以及脱冰跳跃或舞动情况下，不同联相互接近的绝缘子之间不发生局部放电和碰撞。

（4）耐张绝缘子串宜在导线侧（高压侧）将各联绝缘子串相互连接到一起，起到导线和绝缘子串间过渡的作用，以避免耐张绝缘子串因某一联折断而造成

一根或几根导线脱落的情况。

3. 金具设计

（1）整体联板。

联板主要分为组合连板和整体联板两种型式。组合联板可使悬垂线夹摆动更为灵活，单件质量轻，便于制造、运输和安装；整体联板（见图 11-4）的稳定性好，金具零件少，结构简单，但偏重。由于重冰区输电线路对联板稳定性要求较高，因此，重冰区线路在金具选择中多采用整体联板。

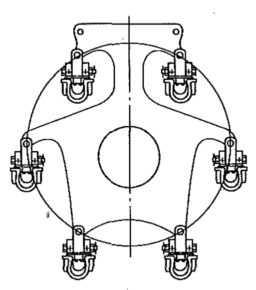


图 11-4　整体联板示意图

（2）非固定线夹。

重覆冰区输电线路在冰冻时期，由于地形因素影响所出现的不均匀覆冰和不同期脱冰所产生的不平衡张力都很大，一般都会达到最大使用张力 40%～50%（导线计算拉断力的 16%～20%），远大于一般非固定型线夹所允许的握着力 11%的水平，故重覆冰线路不得使用非固定型线夹。

（3）固定型重锤。

以往重覆冰地区输电线路曾使用过悬挂式重锤，在运行过程中受脱冰跳跃的冲击而强烈摆动，易发生挂架损坏、重锤脱落、碰坏绝缘子等事故。而固定型重锤可将重锤固定在联板上，避免发生上述事故。

（4）预绞丝式间隔棒。

根据调查分析，重覆冰输电线路的导线间隔棒受重覆冰、不均匀覆冰及脱冰跳跃的影响存在以下特点。

1）导线覆冰后，尾流振动的加强可使间隔棒夹具处导线的弯曲应力增加，同时还会使垂直和横向舞动模式得以加强。

2）导线覆冰的不均匀性。它包括两方面：一是各子导线之间存在覆冰量和形状的不同；二是各子导线覆冰的不对称性，尤其是冻雾型覆冰，往往在各子导线的迎风面发展，形成对子导线本身和整个线束很大的偏心弯矩，将促使线束扭转和间隔棒夹头摆动或滑移。

3）脱冰跳跃。它除了使间隔棒受力进一步复杂之外，还可能在线束附加的冰凌弯矩消失瞬间，出现相应的反相翻转力矩，在间隔棒恢复力矩不足或消失的情况下（如夹头转动、损坏等）很可能造成线束扭绞。

为避免重冰区线路在发生导线翻转、舞动以及脱冰跳跃情况下间隔棒夹头脱落及间隔棒损坏，可采用预绞丝式间隔棒，如图 11-5 所示。重冰区输电线路在选配间隔棒时，注意缩小次档距，增加间隔棒的抗扭强度，以减少事故概率。

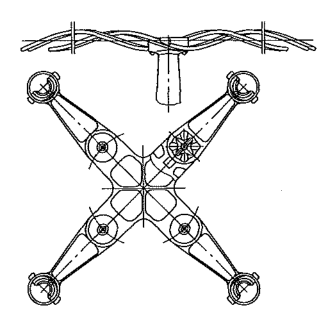


图 11-5　四分裂预绞丝式间隔棒示意图

四、导地线布置

重冰区输电线路的导线及地线布置受不均匀覆冰及不同期脱冰的影响，需要满足导线与地线或导线之间在不同期脱冰时静态和动态接近的电气间隙要求，以防止发生导线与地线间或导线之间的闪络。

1. 线间距离

在导线水平排列的情况下，重覆冰输电线路导线水平线间距离的要求，与轻冰区线路基本相同（要求在各种气象条件下，导线在不同步摆动时，档距中央的最小接近距离应大于相应的电气间隙值）。不同之处在于重覆冰线路的导线相对松驰，且随着设计冰厚的增大而更加松驰，运行过程中由于沿导线各点的风力存在不均匀性，导线在摆动过程中，更容易形成不规则的“蛇”形摆动，使摆动幅值增大，增加相间导线接近的可能性。因此，重冰区线路导线间距离应较轻冰区线路适当增加，以确保安全。根据 DL/T 5440—2009《重覆冰架空输电线路设计技术规程》规定，重覆冰导线的水平线间距离可较《110kV～750kV 输电线路设计规范》导线水平线间距离要求值加大 5%～15%，冰区越重，选取的增加值越大。

2. 水平位移

根据我国重覆冰地区线路多年的运行情况，在初期由于对重覆冰线路的特性认识不足，曾出现不少冰害事件。其中主要的冰害事故之一是导、地线在档距中频繁地闪络接地，甚者地线被烧断，后期采取了加大水平偏移的改造处理措施，运行情况一直良好。

鉴于重冰区导线脱冰跳跃幅度大，为避免垂直排列的导地线在档距中央瞬间动态接近闪络，应在塔头布置时保证足够的水平位移，即重冰区导线与地线之

间的水平偏移值应满足如下要求：

水平偏移值≥工作电压间隙值＋组合导线半径＋导线运动过程中最大偏移距离

DL/T 5440—2009《重覆冰架空输电线路设计技术规程》在总结运行经验的基础上提出了超高压输电线路重覆冰区导地线水平偏移值，见表 11-10。

表 11-10　重冰区导线与地线间的水平偏移值

电压（kV）／水平偏移（m）／冰区（mm）	110	220	330	500	750
20	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
30	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
40	计算决定				
50					

注　1000kV 浙江—福州特高压交流重冰区线路工程导线与地线水平位移取值：20mm 冰区为 4m，30mm 冰区为 4.5m。

3. 导、地线间垂直距离

（1）不均匀覆冰时导地线档中的静态接近。

导地线间静态接近所要求的塔上最小垂直间距，除满足在无风、导线脱冰的情况下按式（11-12）计算的导地线静止状态下的线间距离要求外，还应考虑导地线脱冰时摆动幅值的不同，满足有风、导线脱冰的情况下，导地线风偏后的线间距离要求，按式（11-13）计算。

$$S_v = \sqrt{{S_2}^2 - \Delta S^2} - \lambda_1 + \lambda_2 - f_1 + f_2 \qquad (11\text{-}12)$$

$$S_v = \sqrt{{S_2}^2 - [\Delta S + f_1 \sin\theta_1 - f_2 \sin\theta_2]^2} - \lambda_1 + \lambda_2 - f_1 \cos\theta_1 + f_2 \cos\theta_2 \qquad (11\text{-}13)$$

式中　S_v——导地线间静态接近所要求的塔上最小垂直间距，m；

ΔS——导线与地线间的水平偏移，m；

S_2——线路操作过电压工况下的空气间隙，m；

f_1——导线弧垂，m；

f_2——地线弧垂，m；

λ_1——导线绝缘子串摇摆部分长度，m；

λ_2——地线绝缘子串摇摆部分长度，m；

θ_1——导线的风偏角，（°）；

θ_2——地线的风偏角，（°）。

（2）不均匀覆冰时导地线脱冰跳跃档距中的动态接近。

脱冰跳跃是重覆冰线路主要运行特性之一。理论上导线覆冰后，随着冰凌的增大，导线上的势能和弹性能亦相应增加，当气温回升或受风震影响时，档内整相导线上的冰凌同时一次脱落。此时，导线上原储有的势能、弹性能将迅速转化为动能和新的势能，使导线以半波状向上弹起。随着能量的不断交换，导线以驻波型式上下波动，由于空气阻力，线股摩擦力和绝缘子串摆动惯性力等因素的制约，导线的跳跃幅值迅速衰减，达到新条件下的稳定状态。脱冰过程非常复杂，一般可简化为仅脱部分冰重的单一动态过程。20 世纪 50 年代，苏联曾进行过小比例的模拟试验，对孤立档全部掉冰后导线可能的跳跃幅值按式（11-14）进行计算。

$$H = m\Delta f \times \left(2 - \frac{l}{2000}\right) \qquad (11\text{-}14)$$

式中　H——导线可能的跳跃幅值，m；

l——档距长度，m；

m——导线截面校正系数，$m<1$；

Δf——为导线全部覆冰与部分脱冰时的弧垂差值，按式（11-15）计算。

$$\Delta f = f_o - f \qquad (11\text{-}15)$$

式中　f_0——导线全部覆冰情况下的弧垂，m；

f——导线部分脱冰情况下的弧垂，m。

日本电源开发公司在 500kV 天贵线咨询设计时，曾介绍过日本类似的计算公式，见式（11-16），该公式系理论探讨公式，没有试验依据。

$$H = K_1 K_2 \Delta f \qquad (11\text{-}16)$$

式中　K_1——多档（非孤立档）系数；

K_2——线路参数影响系数，一般为 0.5～1.0。

数值方法对脱冰振动问题进行模拟是 20 世纪 90 年代才发展起来的一种方法，它弥补了在实际线路上做脱冰试验既昂贵又存在局限性的特点。我国科研院所利用有限元软件建立典型耐张段输电线路覆冰及脱冰的有限元计算模型，计算模拟典型耐张段线路在不同脱冰工况下导地线的动力响应。通过有限元模型，重庆大学分析了不同档数、档距、高差、脱冰位置、脱冰档数、脱冰率、覆冰厚度等对输电线路冰跳的影响，包括冰跳高度随时间的变化规律、导线脱冰后的运动轨迹以及相邻档张力差的变化等，通过对有限元模拟计算结果的分析，给出了计算连续档脱冰跳跃高度的经验公式，见式（11-17）。

$$H = \left(2.162 - \frac{\sigma}{100}\right) \cdot \Delta f \qquad (11\text{-}17)$$

式中　σ——应力，N/mm²。

为了减少或避免导线间以及导线与地线间的闪络事故，重覆冰区线路杆塔上应有足够的垂直线距和水平位移，以满足导线与地线或导线之间在不同期脱冰

时静态和动态接近的电气间隙要求。静态接近垂直距离不应小于操作过电压的间隙值；动态接近距离不应小于工频（工作）电压的间隙。

校验条件：按连续档中间一档导线脱冰，其余档导线和地线不脱冰计算。中间档的脱冰率，宜根据运行经验确定。当缺乏资料时，对 110～220kV 重冰区线路可选不小于设计冰重的 60%，110～220kV 中冰区线路可选不小于设计冰重的 50%，330kV 及以上重冰区线路可选不小于设计冰重的 80%，330kV 及以上中冰区线路可选不小于设计冰重的 70%。

五、融冰技术

融冰的基本原理是在线路上通过高于正常电流密度的传输电流以获得焦耳热进行融冰。根据提供融冰电流的电源区分，主要可分为交流及直流融冰两种方式。

1. 交流融冰

（1）高压交流融冰。将线路一端短接，利用变电站 110kV 电源提供短路电流，对输电线路进行融冰。

（2）中低压交流融冰。将线路一端短接，利用变电站 10kV 或 35kV 电源提供短路电流，对输电线路进行融冰。

（3）水电机组零起升压交流融冰。先将线路短路，利用水电站发电机组零起升压提供融冰电源对输电线路进行融冰。

（4）串联电容补偿交流融冰。在线路首端串联电容补偿线路感抗，在线路末端进行三相短接，对输电线路进行融冰。

2. 直流融冰

直流融冰技术是将覆冰线路作为负载，施加直流电源，用较低电压提供直流电流来加热导线使线路的覆冰融化。针对输电线路的 A、B、C 三相，直流融冰可以实现“一去一回”和“一去两回”的融冰方式。

直流融冰按安装型式可分为固定式和移动式两种型式，按控制方式可分为不可控和可控两种方式。

采用直流融冰方式可减少融冰所需要的电源容量；同时还可避免交流融冰时需要进行的线路阻抗匹配和繁杂的倒闸操作。

3. 融冰电流选取

（1）最大融冰电流。

融冰电流是指输电线路覆冰后，在相应的环境温度、风速条件和给定的时间下，使输电线路覆冰融化的电流。目前，在输电线路最大融冰电流计算中常用的经验公式为苏联的布尔斯道尔夫融冰电流计算公式。该公式的表达式为

$$I_r^2 R_0 T_r = \frac{\Delta t}{R_{TO}+R_{T1}} \times T_r + 10 g_o d b + \frac{0.045 g_o D^2}{R_{TO}+R_{T1}} \times \left(R_{T1} + 0.22 \frac{R_{TO}}{\lg \frac{D}{d}} \right) \Delta t \tag{11-18}$$

式中 I_r——融冰电流，A；

R_0——0℃时的导线电阻，Ω/m；

T_r——融冰时间，h；

Δt——导体温度与外界气温之差，℃；

g_o——冰的密度，g/mm³；

b——覆冰厚度，cm；

D——导体覆冰后的外径，cm；

R_{TO}——等效冰层传导热阻，℃·cm/W；

$$R_{TO} = \frac{\lg \frac{D}{d}}{273\lambda} \tag{11-19}$$

d——导线直径，cm；

λ——导热系数，W/（cm·℃），对雨凇，$\lambda = 2.27\times10^{-2}$；对雾凇，$\lambda = 0.12\times10^{-2}$；

R_{T1}——对流及辐射等效热阻，℃·cm/W。

对雨凇：
$$R_{T1} = \frac{1}{0.09D + 0.22 + 0.73(vD)^{2/3}} \tag{11-20}$$

对雾凇：
$$R_{T1} = \frac{1}{0.04D + 0.84(vD)^{3/4}} \tag{11-21}$$

式中 v——风速，m/s。

（2）最小融冰电流。

最小融冰电流是指在相应的环境温度和风速条件下，使输电线路覆冰融化所需的最小电流。最小融冰电流是导线覆冰后满足融冰要求的最小电流。

$$I_{min}^2 R_0 = \frac{\Delta t}{R_{TO}+R_{T1}} \tag{11-22}$$

式中 I_{min}——导线最小融冰电流，即保线电流，A。

（3）覆冰最大允许电流。

最大允许电流是指融冰过程中，在相应的环境温度和风速条件下，短时间内允许输电线路达到最高温度（如 90℃）所通过的最大电流，也称最大融冰电流。其计算公式如下。

（1）当风速＞2m/s 时：

$$I_{max}^2 R_{90} = \left[7.24 \left(\frac{318 + 0.5 t_2}{1000} \right) \varepsilon_i + 0.7 \left(\frac{vd}{2} \right)^{\frac{3}{4}} (90 - t_2) \right] \tag{11-23}$$

（2）当风速≤2m/s 时：

$$I_{max}^2 R_{90} = 0.0314d\left[2\varepsilon_i(1+0.01t_2)+5.1\left(\frac{1}{d}\right)^{0.25}\right](90-t_2)^{1.3} \tag{11-24}$$

式中 R_{90}——导线温度为90℃时的电阻，Ω；

I_{max}——导线最大允许电流，A；

t_2——外界温度，℃；

d——导线直径，cm；

v——风速，m/s；

ε_i——辐射系数。

六、交叉跨越距离

重覆冰线路在正常运行条件下应满足规程规定的对地及交叉跨越距离要求，同时，由于重覆冰区线路存在不均匀覆冰、过载覆冰的情况，交叉跨越距离校核时还应满足以下要求。

（1）鉴于重覆冰线路在长期运行中，冰凌过载情况是始终存在的，所以对于采用孤立档交叉跨越的重要被跨越物，其安全间隙距离需要按验算覆冰情况校验。

（2）对于一般被跨越物，当采用连续档交叉跨越时，其安全间隙距离需按导线不均匀覆冰时情况进行校验。校验条件为跨越档内导线覆有50%设计冰载，其余档无冰、无风、气温−5℃。

（3）对重要交叉跨越物采用非孤立档跨越时，除校验不均匀覆冰时安全间隙距离外，还需按实际跨越情况校核邻档断线时的最小安全间隙距离。

（4）重覆冰线路跨越电力线、通信线、承力索和索道时，当被跨越物档距较大，必要时，还需校验线路下方被跨越物脱冰跳跃时，瞬间动态接近距离最小垂直间距。

（5）重覆冰线路由于导线的垂直荷载大，纵向张力大，故选用的耐张绝缘子串的机械强度较高、联数较多，造成绝缘子串整体较重。而串重与线重之比对导线弧垂的影响不可忽略，尤其是特高压输电线路串重对导线弧垂的影响尤为突出，因此，重要交叉跨越及孤立档还应考虑耐张绝缘子串重量对导线弧垂的影响。

（6）验算覆冰条件、导线不均匀覆冰情况下对被交叉跨越物的间隙距离应按操作过电压间隙校验。

七、防冰闪措施

为了预防重覆冰地区线路绝缘覆冰闪络，在设计阶段，需要准确划定重覆冰区线路的覆冰厚度、污秽情况等外部条件，科学合理地确定绝缘子覆冰闪络电压梯度，同时通过增加绝缘子片数、采用V型串和倒V型串、大小盘径绝缘子插花使用、涂抹防冰涂料等措施防提高线路耐冰闪能力。

（1）增加绝缘子片数，降低运行耐压梯度。在重冰区输电线路路径选择时，应尽量避让多雨凇地区、微地形微气象区等易覆冰区。无法避让时，应结合污秽、海拔等条件对外绝缘配置参数进行校验，通过增加绝缘子片数、增加绝缘子串干弧距离、降低绝缘子运行耐压梯度，满足绝缘子的覆冰耐压要求。

（2）采用V型串和倒V型串，提高覆冰绝缘子串耐受电压水平。V型串的悬挂方式使绝缘子串结冰后很难沿绝缘子表面形成冰桥，绝缘子串的泄漏距离受覆冰形成的冰桥短接影响较小，提高了覆冰闪络电压。

由于泄漏电流的热效应，V型串两片绝缘子之间桥接的部分容易出现“融断”的现象，这也就进一步增加了绝缘子串沿表面覆冰放电通道的空气间隙，从而使V型串的覆冰闪络电压高于I型串。

倒V型串布置方式与V型串布置方式相似，覆冰很难在绝缘子表面形成冰桥，从防冰闪角度考虑V型串和倒V型串可明显提高重覆冰区覆冰绝缘子串耐受电压。

（3）采用空气动力型绝缘子插花型式，减少绝缘子被冰柱桥接的概率。采用N片正常盘径绝缘子和1片大盘径绝缘子组合成“$N+1$”的间插方式，在绝缘子覆冰期间，可阻止冰凌在大伞间跨接、延缓整串绝缘子覆冰桥接时间。在融冰期，这种方法可阻止高电导率的融冰水形成“水帘”，防止绝缘子串外表面形成闪络通道，从而达到提高冰闪电压的目的。

（4）改善复合绝缘子的伞裙结构，提高复合绝缘子冰闪电压。通过优化复合绝缘子伞裙大小和布置型式，改善复合绝缘子的覆冰特性。此外，通过改进两端均压环结构，也可以在一定程度上使绝缘子不结冰部分长度增加，提高复合绝缘子冰闪电压。

（5）利用防覆冰涂覆材料，延缓覆冰。通过在输电线路导线或绝缘子上覆涂具有憎水性能的涂料，降低冰与涂覆材料基底表面的附着力，虽不能完全防止冰的形成和附着，但其覆冰的量级要大大减少，同时可使冻雨或雪等在冻结或黏结到导线或绝缘子表面之前就可以在自然力（如风或导线及绝缘子的摇摆）的作用下滑落，或者使冰或雪在导线或绝缘子表面的附着力明显降低，以达到延缓覆冰、减少线路出现冰害事故的目的。研究表明防覆冰涂覆材料在覆冰初期具有延缓覆冰的作用，但在覆冰严重时其效果并不明显。

第四节 荷 载 计 算

一、重覆冰区荷载

DL/T 5440—2009《重覆冰架空输电线路设计技术规程》对覆冰工况下杆塔荷载做出了详细规定，有关计算的内容摘录如下。

1. 风荷载取值

（1）导线、地线覆冰时风荷载标准值，按式（11-25）计算。

$$W_x = \alpha \cdot W_0 \cdot \mu_z \cdot \mu_{sc} \cdot \beta_c \cdot B_1 \cdot d \cdot L_h \cdot \sin^2\theta \tag{11-25}$$

$$W_0 = \frac{v_0^2}{1600} \tag{11-26}$$

式中 W_x——垂直于导线及地线方向的水平风荷载标准值，kN；

α——风压不均匀系数，应根据设计基本风速确定；

β_c——500kV 及以上交流、±400kV 及以上直流线路导线及地线风荷载调整系数；

μ_{sc}——导线或地线体型系数；

μ_z——风压高度变化系数；

d——导线或地线覆冰（密度 $0.9g/cm^3$）的计算外径，m；

L_h——杆塔的水平档距，m；

B_1——导线、地线及绝缘子覆冰后风荷载增大系数（15mm 冰区取 1.3，20mm 及以上冰区取 1.5～2.0）；

θ——风向与导线或地线方向之间的夹角，（°）；

W_0——基准风压标准值，按式（11-26）计算，kN/m^2；

v_0——基准高度为 10m 的风速，m/s。

（2）绝缘子串风荷载的标准值，应按式（11-27）计算。

$$W_I = W_0 \cdot \mu_z \cdot B_1 \cdot A_I \tag{11-27}$$

式中 W_I——绝缘子串风荷载标准值，kN；

A_I——绝缘子串承受风压面积计算值，m^2。

（3）杆塔自身（包括立体横担及支架）覆冰时风荷载标准值，按式（11-28）计算。

$$W_s = W_0 \cdot \mu_z \cdot \mu_s \cdot \beta_z \cdot B_2 \cdot A_s \tag{11-28}$$

式中 W_s——杆塔风荷载标准值，kN；

β_z——杆塔风荷载调整系数；

μ_s——构件的体型系数；

A_s——构件承受风压的投影面积计算值，m^2；

B_2——构件覆冰后风荷载增大系数（15mm 冰区取 1.6，20mm 取 1.8，20mm 以上冰区取 2.0～2.5）。

2. 不均匀冰荷载

不均匀冰荷载情况是重覆冰区线路中主要的冰荷载型式之一，不均匀覆冰工况下产生的纵向张力对铁塔设计起主要控制作用。按照 DL/T 5440—2009《重覆冰架空输电线路设计技术规程》的规定，不均匀覆冰率取值见表 11-11。

表 11-11 不 均 匀 覆 冰 率 取 值

线路等级	悬垂型杆塔		耐张型杆塔	
	覆冰率（%）		覆冰率（%）	
	一侧	另一侧	一侧	另一侧
一类	100	20	100	0
二类	100	30	100	15
三类	100	40	100	30

注 1. 按《重覆冰架空输电线路设计技术规程》规定，一类为 750、500kV 和重要 330kV 线路；二类为 330kV 及重要 220kV 线路；三类为 220kV 及 110kV 线路。
2. 1000kV 交流特高压和±400kV 及以上直流线路工程按一类取值。

仅规定覆冰率能使各工程更好地结合实际情况选取合理的不平衡张力值，考虑到各覆冰率下的不平衡张力计算较为烦琐、复杂，为便于简化并统一不平衡张力数值，DL/T 5440—2009《重覆冰架空输电线路设计技术规程》提出了不同冰区不均匀覆冰时导、地线不平衡张力取值，作为计算不平衡张力的下限值。

中冰区不均匀覆冰情况的导、地线的不平衡张力的取值除按表 11-11 的覆冰率进行计算外，具体取值不应低于表 11-12 规定的导、地线最大使用张力的百分数值。

表 11-12 中冰区不均匀覆冰的导、地线不平衡张力取值表 %

冰区	悬垂型杆塔		耐张型杆塔	
	导线	地线	导线	地线
15mm	15	25	35	45
20mm	20	30	40	50

注 垂直冰荷载按 75%覆冰计算。

重冰区不均匀覆冰情况的导、地线的不平衡张力的取值除按表 11-11 的覆冰率进行计算外，具体取值不应低于表 11-13 规定的导、地线最大使用张力的百分数值。

表 11-13　重冰区不均匀覆冰的导、地线不平衡张力取值表　%

冰区	悬垂型杆塔		耐张型杆塔	
	导线	地线	导线	地线
20mm	25	46	42	54
30mm	29	50	46	58
40mm	33	54	50	63
50mm	38	58	54	67

注　垂直冰荷载按 75%覆冰计算。表中数值为最大使用张力的百分数。

3. 断线荷载

重覆冰输电线路杆塔断线条件是覆冰断线，目的在于增大断线后残余张力，以增强杆塔的抗扭能力。断线冰荷载选用规定的设计覆冰率，同时要求断线覆冰率随设计冰厚增加而加大、断线覆冰率随线路等级提高而加大，以达到杆塔的抗扭强度能合理增强的目的。

DL/T 5440—2009《重覆冰架空输电线路设计技术规程》规定，中冰区线路导线、地线的断线张力应满足表 11-14 取值要求。

表 11-14　中冰区断线张力取值表　%

冰区	断线张力（最大使用张力的百分数）						
	悬垂型杆塔				耐张型杆塔		
	单导线	双分裂导线	双分裂以上导线	地线	单导线	双分裂及以上导线	地线
15mm	50	40	35	100	100	70	100
20mm	50	50	45	100	100	70	100

重冰区断线张力可按表 11-15 覆冰率计算。

表 11-15　重冰区导线、地线的断线时覆冰率　%

冰区		悬垂型杆塔			耐张型杆塔		
		覆冰率			覆冰率		
		一类	二类	三类	一类	二类	三类
重冰区	20mm	70	60	50	100	70	60
	30mm	80	70	60	100	80	70
	40mm	90	80	70	100	90	80
	50mm	100	90	80	100	100	90

注　垂直冰荷载按 100%覆冰计算。

重冰区线路导线、地线的断线张力除应按表 11-15 的覆冰率进行计算外，断线张力取值应不低于表 11-16 所列。

表 11-16　重冰区断线张力取值表　%

冰区	断线张力（最大使用张力的百分数）				
	悬垂型杆塔		耐张型杆塔		
	导线	地线	单导线	双分裂及以上导线	地线
20mm	55	100	100	75	100
30mm	60	100	100	80	100
40mm	65	100	100	85	100
50mm	70	100	100	90	100

4. 验算覆冰荷载

验算覆冰荷载情况是作为正常设计情况之外的补充计算条件提出来的。主要在于弥补设计条件的不足，用以校验和提高线路在稀有的验算覆冰情况下的抗冰能力。它的荷载特点是在过载冰的运行情况下，同时存在较大的不平衡张力。

二、重覆冰区荷载组合

（一）重覆冰区铁塔荷载组合原则

DL/T 5440—2009《重覆冰架空输电线路设计技术规程》第 12.0.4 条规定：“各类杆塔均应按线路的正常运行情况（包括基本风速、设计冰厚、最低气温及其组合）、断线情况、不均匀冰荷载情况和安装情况的荷载进行计算。必要时，还需按稀有的覆冰荷载情况进行验算。”

输电线路重覆冰区多位于交通困难地区，运行维护困难，且冰害事故发生时天气恶劣，抢修极其困难，造成的事故损失大，因此在荷载组合时应根据实践经验及路径情况计入各种组合模式。

（1）正常覆冰。

正常覆冰工况同时风速中冰区取值 10m/s，重冰区取值 15m/s。中冰区导地线覆冰风荷载较小，可只组合 90°风工况；重冰区因导地线风荷载较大，除组合 90°风荷载外，悬垂直线塔还应根据构件控制情况组合 0°、60°或 45°风。

耐张塔还应组合大小转角情况、上拔下压情况及档距不均匀或高差引起的纵向张力差等。

（2）不均匀冰。

不均匀冰荷载是重覆冰线路特有的荷载型式之一，在运行中常见的有覆冰不均匀和脱冰不均匀两种主要类型。

1）覆冰不均匀荷载，主要是由于线路各段所处的

地形、高程、风速、风向等不同，而使杆塔两侧导地线上冰凌存在较明显的差别。其主要特点是：①不均匀冰荷载持续时间相对较长；②导地线具有同期性，因而对杆塔会产生较大的纵向弯矩；③由于受覆冰全过程气候因素影响，其覆冰不均匀度变动较大。

2）脱冰不均匀荷载多是在覆冰不均匀冰荷载基础上发展而成的另一种不均匀冰荷载型式。其特点是：①在整个冰凌融化阶段出现的某种静态不均匀冰荷载情况，持续时间相对较短；②其不均匀性与冰凌性质密切相关。雨凇类冰凌脱冰不均匀程度很小；混合凇、湿雪类一次脱冰可能达到100%，从而产生较大的张力差；③由于导地线各档各相冰凌脱落时间先后不同，不均匀冰荷载组合型式多样，有时会使杆塔受到最大的弯矩或扭矩。

根据《重覆冰架空输电线路设计技术规程》的规定，产生不平衡张力的不均匀冰荷载情况按未断线、–5℃、有不均匀冰、同时风速10m/s计算；各类杆塔不均匀覆冰的不平衡张力应计算下列荷载组合：

1）所有导线、地线同时同向有不平衡张力，使杆塔承受最大纵向弯矩见图11-6（a）；同时风速除组合90°风荷载外，悬垂直线塔及小角度耐张塔及终端塔还应组合0°风工况。

2）所有导线、地线同时不同向有不平衡张力，使杆塔承受最大扭矩，见图11-6（b）。

3）对于横担较长的重冰区铁塔还应计算一侧正常覆冰，一侧不完全覆冰的工况，使铁塔承受最大横向弯矩见图11-6（c）；不完全覆冰的覆冰率可按表11-11取值。

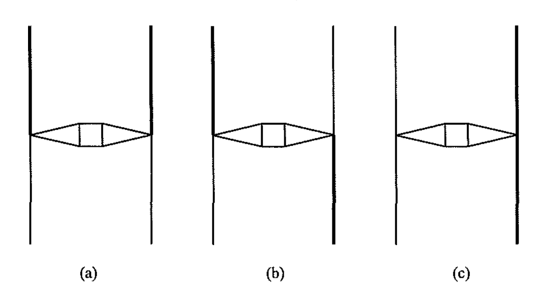


图11-6 弯矩、扭矩示意图

（a）纵向最大弯矩；（b）大扭矩；（c）横向最大弯矩

（3）断线。

断线情况按断线、温度取–5℃、设计冰厚、无风荷载计算。

1）单回路悬垂型杆塔断线组合工况。

中冰区：单导线断任意一相导线（分裂导线任意一相导线有纵向不平衡张力），地线未断；断任意一根地线，导线未断。

重冰区：断任意一相导线，地线未断；断任意一根地线，导线未断。

2）单回路耐张型杆塔断线组合工况。

中冰区：同一档内，单导线断任意两相导线（分裂导线任意两相导线有纵向不平衡张力），地线未断；断任意一根地线，单导线断任意一相导线（分裂导线任意一相导线有纵向不平衡张力）。

重冰区：同一档内，断任意两相导线、地线未断；断任意一根地线和任意一相导线。

中冰区多回路杆塔的断线工况组合同轻冰区。

（4）验算覆冰。

DL/T 5440—2009《重覆冰架空输电线路设计技术规程》12.0.7规定：验算覆冰荷载情况，按验算冰厚、–5℃、10m/s风，所有导线、地线同时同向有不平衡张力，使杆塔承受最大弯矩情况。

重覆冰线路铁塔验算冰荷载可根据覆冰观测资料、微地形等实际情况考虑过载冰、过载不均匀冰等工况，可根据实际情况计算以下三种情况中的一种或多种：

1）过载冰，组合时应包含高差及档距不均匀等因素引起的纵向张力；

2）过载不均匀冰，不仅应包含高差及档距不均匀引起的纵向张力，还应计入覆冰或脱冰不均匀引起的张力差；

3）对于横担较长的悬垂直线铁塔，计算一侧验算冰、一侧正常覆冰的工况。

（5）脱冰跳跃。

DL/T 5440—2009《重覆冰架空输电线路设计技术规程》12.0.8规定：垂直档距系数（垂直档距与水平档距之比）小于0.8的悬垂铁塔，应按导线、地线脱冰跳跃和不均匀覆冰时产生的上拔力校验导线横担和地线支架，导线上拔力取最大使用张力的5%～10%，地线上拔力可取最大使用张力的5%。

相邻塔位高差较大时，耐张塔还应计算一侧上拔一侧下压情况，校验耐张型杆塔横担受扭情况。

（二）重覆冰区铁塔荷载组合

单回路悬垂塔荷载组合见表11-17。

表11-17 单回路悬垂塔荷载组合

序号	工况分组	工况描述	备注
1	正常覆冰	正常覆冰，90°风	
2		正常覆冰，60°风	重冰区铁塔可采用
3		正常覆冰，45°风	重冰区铁塔可采用
4		正常覆冰，0°风	重冰区铁塔可采用

续表

序号	工况分组	工况描述	备注
5	不均匀覆冰	覆不均匀冰，最大弯矩，90°风	
6		覆不均匀冰，最大弯矩，0°风	
7		覆不均匀冰，最大扭矩，90°风	
8		覆不均匀冰，横担最大弯矩，90°风	重冰区铁塔可采用
9	覆冰断线	断一根地线，导线未断	
10		断任意一相（极）导线（或分裂导线任意一相导线有纵向不平衡张力），地线未断	
11	验算冰	验算冰，90°风	重冰区铁塔可采用
12		验算冰，60°风	重冰区铁塔可采用
13		验算冰，45°风	重冰区铁塔可采用
14		验算冰，0°风	重冰区铁塔可采用
15		验算不均匀冰，最大弯矩，90°风	重冰区铁塔可采用
16		验算不均匀冰，最大弯矩，0°风	重冰区铁塔可采用
17		验算不均匀冰，最大扭矩，90°风	重冰区铁塔可采用
18		验算不均匀冰，左侧正常覆冰，右侧验算冰，90°风	重冰区铁塔可采用
19	脱冰跳跃	左侧脱冰跳跃，右侧正常覆冰，90°风	
20		所有相（极）脱冰跳跃，90°风	

单回路耐张塔荷载组合见表 11-18。

表 11-18　单回路耐张塔荷载组合

序号	工况分组	工况描述	备注
1	正常覆冰	正常覆冰，90°风	
2		正常覆冰，0°风	重冰区小角度可选用
3	不均匀覆冰	覆不均匀冰，最大弯矩，90°风	
4		覆不均匀冰，最大弯矩，0°风	
5		覆不均匀冰，最大扭矩，90°风	
6	覆冰断线	断任意一根地线及任意一相（极）导线，其余未断	

续表

序号	工况分组	工况描述	备注
7	覆冰断线	断任意两相导线，地线未断	交流
7A		断任意一极导线，地线未断	直流
8	验算冰	验算冰，90°风	
9		验算不均匀冰，最大弯矩，90°风	
10		验算不均匀冰，最大弯矩，0°风	

注　1. 在上述工况基础上还应根据转角度数、垂直荷载（上拔、下压）情况及纵向张力情况进一步组合。

2. 同时风的风向应根据水平荷载的主要方向确定，如小角度耐张塔，考虑前后侧大小张力组合时，应采用 0°风组合；大角度耐张塔，前后侧均采用大张力组合时，应采用 90°风组合。

3. 双回路铁塔荷载组合。双回路塔型一般只用于中冰区，其荷载组合方式除需增加不均匀覆冰最大扭外，其余同轻冰区同塔双回路组合。

第五节　重覆冰区塔型选择

根据多年的工程实践经验及事故调查结果，重覆冰区输电线路塔型选择主要应遵循以下主要原则：①铁塔宜采用导线对称布置的自立式铁塔。②重覆冰线路因大高差、档距不均匀、不均匀覆冰或不均匀脱冰等因素影响，可能存在较大的顺线路方向的张力或扭转荷载，铁塔塔身宜采用纵向刚度及抗扭刚度均较好的方形断面。③铁塔结构型式应根据重覆冰线路的特点进行综合技术经济比较后确定，不应采用转动横担或变形横担。

中冰区输电线路可采用单回路或多回路架设，重冰区线路多采用单回路架设，国内按同塔双回路架设的 500kV 交流和±500kV 直流线路在路径困难区已有一定的设计经验，但由于其经济性较差、技术成熟度有待进一步检验，在一般线路工程中未推广应用。

交流重覆冰区铁塔多采用三角形排列的猫头塔、干字塔，水平排列的酒杯塔、门型塔；双回路铁塔一般采用导线垂直排列的鼓型塔、正伞型塔或倒伞型塔。其中，重冰区悬垂塔一般采用水平排列的酒杯塔或门型塔；20mm 冰区耐张塔可采用三角形排列的干字塔或水平排列的酒杯塔、门型塔，30mm 冰区及以上一般采用水平排列的酒杯塔或门型塔。交流线路重冰区单回路铁塔常用塔型示意如图 11-7 所示。

直流线路重覆冰区铁塔一般采用干字形铁塔，单回路铁塔常用塔型示意如图 11-8 所示。重覆冰区铁塔型式适用表见表 11-19。

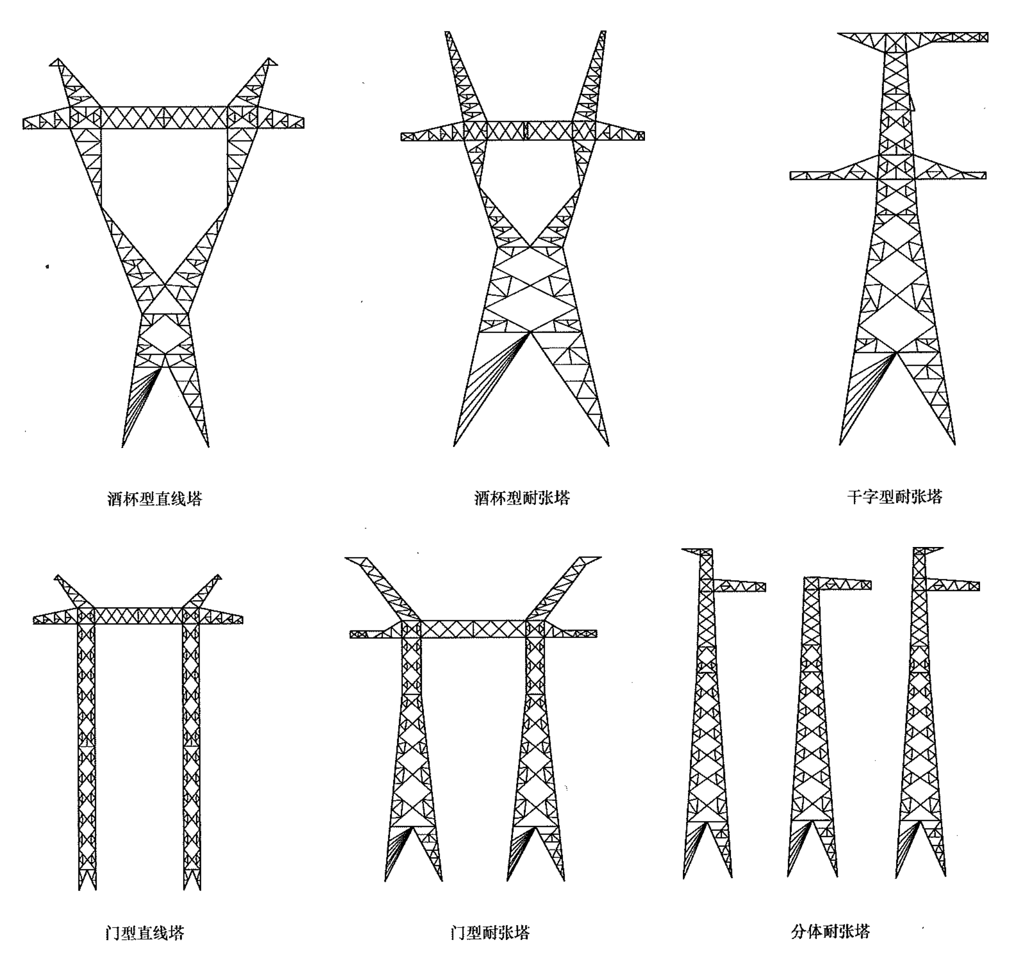


图 11-7 交流线路重冰区单回路铁塔常用塔型示意图

表 11-19 **重覆冰区铁塔型式适用表**

线路型式	冰区	架设方式	受力方式	电压等级	铁塔型式
交流	中冰区	单回路	悬垂塔	—	酒杯型塔、门型塔、猫头型塔
			耐张塔	—	干字型塔、酒杯型塔、门型塔、分体塔
		双回路	悬垂塔	—	鼓型塔、正伞型塔、倒伞型塔
			耐张塔	—	鼓型塔、正伞型塔、倒伞型塔、分体塔
	重冰区	单回路	悬垂塔	—	酒杯型塔、门型塔
			耐张塔	超高压	酒杯型塔、门型塔、分体塔
				特高压	干字型、酒杯型塔、门型塔、分体塔
		双回路	—	超高压	鼓型塔
直流	—	—	悬垂塔	—	干字型塔
			耐张塔		干字型塔、分体塔

注 单回路架设的交流超高压重冰区耐张塔，除 500kV 等级线路在 20mm 重冰区经技术经济比较后可采用干字型，其余冰区及电压等级线路耐张塔一般宜采用水平排列方式的酒杯型塔或门型塔。

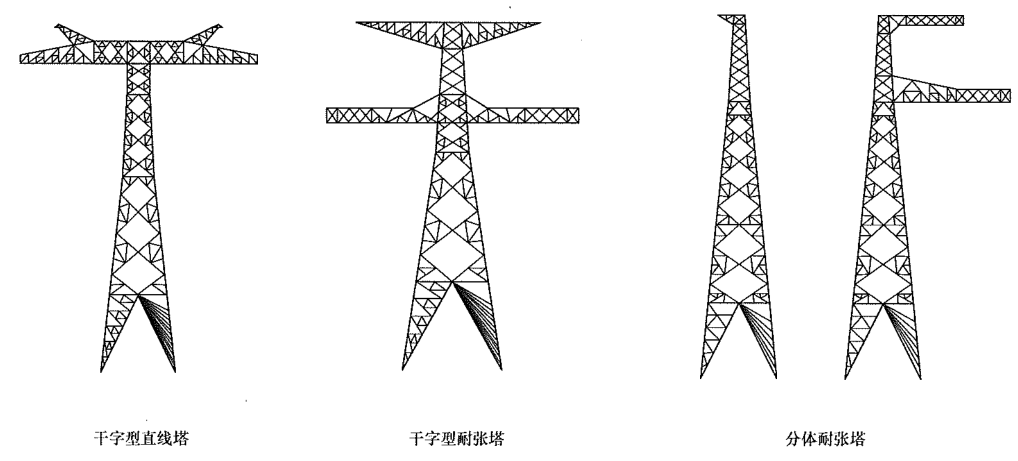
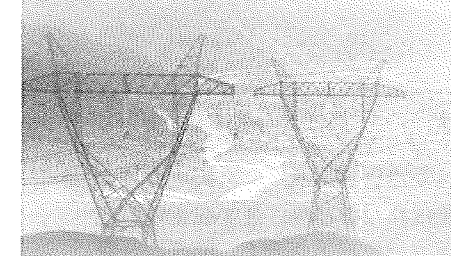


图 11-8　直流线路重冰区单回路铁塔常用塔型示意图



第十二章

大 跨 越 线 路

线路跨越通航江河、湖泊或海峡等，因档距较大（在 1000m 以上）或杆塔较高，导线选型或铁塔设计需特殊考虑，且发生故障时严重影响航运或修复特别困难的耐张段应按大跨越设计。我国大跨越工程数量世界第一，大跨越设计和实践经验丰富，在电压等级、输送容量、导线型式和杆塔高度等方面均处于国际领先水平。据不完全统计，自 1959 年起至 2017 年，我国已建成交直流 110kV 及以上大跨越线路 226 处，其中交流 110kV 有 14 处、220kV 有 86 处、500kV 有 85 处、1000kV 有 7 处；直流±500kV 有 20 处、±660kV 有 1 处、±800kV 有 13 处。大跨越输电线路设计技术发展迅速，技术方案因工程而异，新技术、新材料、新工艺、新方法在大跨越工程中得以推广与应用。

第一节　跨越点及方案选择

一、跨越点选择

大跨越是输电线路中极其重要的组成部分，跨越方案的选择与整个线路路径密切相关，当可选跨越点方案不唯一时，应对跨越点位置与两端一般线路路径进行整体考虑，对综合方案进行技术经济比较，择优选择跨越点。在技术经济比较时，跨越点及连接的一般线路段需要综合考虑所在区域的规划、民航、部队、航道、海事、水利、环保等相关部门的意见，将具备可行性的方案进行技术经济比选。选择的跨越点最终需要取得相关部门的认可意见。

跨越位置的选择应综合考虑水文、地质条件，宜避开河道不稳定、地震断裂、崩塌滑坡、山洪冲刷等影响线路安全运行的地带，对于无法避开的应采取可靠措施。随着《中华人民共和国防洪法》的出台，负责堤防管理的水利部门也对跨越塔位置提出了新的管理要求；除控制塔位对堤防的安全距离外，还要由专业部门针对跨越方案进行防洪影响评价以及通航安全影响论证，必要时还要由专业部门论证对第三方水工建筑物的影响。另外，大跨越基础的施工，还受到汛期的制约，必须结合工期等一起考虑。

大跨越塔宜设置在 5 年一遇洪水淹没区以外，为避免工程建成后由于河床变迁使基础受水流冲刷，影响线路安全运行，跨越塔位置需考虑河床变迁的影响，以确保运行安全。受跨越点限制，需在江（河）中立塔时，应考虑河床稳定和避开主航道，应考虑塔基冲刷深度及基础高度。位于江（河）中的基础，应考虑漂流物的撞击作用和水流的水压作用，当按此设计的基础造价太高时，为降低工程造价宜采用防冲撞措施。

大跨越应自成一个耐张段。由大跨越工程设计标准较陆上一般线路为高，施工难度大，因此要求自成一个耐张段以便于施工。采取独立的耐张段可限制事故范围，提高运行可靠性。

跨越塔采用悬垂型或耐张型，应根据地形、地质、施工和运行等条件，通过技术经济比较确定。大跨越的跨越方式根据跨越位置的地理、运行条件确定，一般采用耐—直—直—耐的方式，也可采用 2 基以上直线跨越塔连续跨越的方式，当具备地形条件时，还可采用耐张塔跨越。各种跨越方式均需结合地形地貌、地质、水文及施工运行条件，进行综合技术经济比较后确定。

大跨越工程应结合系统规划，宜按同塔双回路或多回路设计。随着电网规模迅速扩大，大跨越线路日益增加。但是，随着城乡建设的发展，跨越点资源变得越来越宝贵，因此，大跨越工程宜按同塔双回路或多回路设计。当系统规划中不存在出现第二回线路的可能性时，宜采用单回路设计。

导线舞动对线路安全运行所造成的危害十分严重，诸如线路频繁跳闸与停电、导线的磨损、烧伤与断线、金具及有关部件的损坏等，造成重大的经济损失与社会影响。因此，对工程所在地及周边地区应进行舞动调研，应尽可能避开舞动多发地区、避开雨凇或冻雨地带、避免横穿风口江河湖面；在易舞动地区或平原开阔地带，应尽可能减小大跨越段线路走向与冬季主导风向夹角。

二、跨越方案选择

跨越点选定后，由于外部环境复杂，需要对该跨越点的跨越方案（不同线位、回路数、独立耐张段跨越方式、单双锚塔等）进行更加精细的比选。综合考虑水文、地质、航运、防洪、地方规划等因素进行进一步的技术经济比较，以确定最终跨越方案。

第二节 气象参数

大跨越设计气象条件应根据跨越点附近气象资料的数理统计结果并考虑附近已有工程的运行经验确定，基本风速、设计冰厚的重现期见表 12-1。

表 12-1 大跨越工程气象重现期

电压	110～330kV	500～750kV、±500～±660kV	1000kV、±800kV、±1100kV
重现期	30 年	50 年	100 年

一、设计风速

基本风速应按当地气象台、站 10min 时距平均的年最大风速作样本，并宜采用极值 I 型分布作为概率模型，取最大风速统计值。统计风速的高度取历年大风季节平均最低水位以上 10m。大跨越基本风速，如无可靠资料，宜将附近陆上输电线路的风速统计值换算到跨越处历年大风季节平均最低水位以上 10m 处，并增加 10%。

一般跨江跨湖的地面大都属于 B 类粗糙度，跨海处可划为 A 类粗糙度。大跨越杆塔的高度一般在 130～400m 之间，100m 以上的塔身、横担的风荷载和线条风荷载对铁塔和导线的设计起到关键的作用，在 100～400m 的高度范围内，A 类粗糙度与 B 类粗糙度的风压比值约为 1.05～1.148，因此，考虑大跨越处水面影响，将历年大风季节平均最低水位以上 10m 处的风速再增加 10%后，大跨越工程可按 B 类粗糙度设计。

按以上方法确定的基本风速应不低于相连接的陆上线路的基本风速（换算到同一高程），且 330kV 及以下大跨越不低于 25m/s，500～1000kV 和±500～±1100kV 大跨越不低于 30m/s。必要时还宜按稀有风速条件进行验算。验算大风条件可按历史上有记录的稀有大风数据选定，计算验算条件时，可变荷载组合系数应取 0.75。

对风速观测值进行换算和数理统计的计算方法见第五章第一节。另外，将工程所在地风压折算为风速并与风速数理统计结果进行对比的方法见第五章第一节。

二、设计覆冰

在有足够的覆冰观测资料情况下，宜采用极值 I 型分布概率模型确定线路设计冰厚；甚少或无覆冰观测资料时，可在搜集冰凌资料的基础上，结合线路周围地形、地物、相对高差、路径走向、覆冰气象等要素及附近已建线路运行情况综合分析确定设计冰厚。

大跨越设计冰厚，除无冰区外，宜较附近一般输电线路的设计冰厚增加 5mm。必要时还宜按稀有覆冰条件进行验算。地线设计冰厚，除无冰区外，应较导线设计冰厚增加 5mm，但该条件仅用来计算地线覆冰的垂直荷载，加强地线支架的机械强度设计。大跨越工程的冰区属性和覆冰时的荷重计算原则，按导线覆冰值决定。验算覆冰条件可按历史上有记录的稀有覆冰数据选定，计算验算条件时，可变荷载组合系数应取 0.75。

三、其他气象参数

其他气象参数选取的规定同一般线路要求见第五章第一节。

第三节 导、地线选型

导线和地线（含 OPGW）的选择，应进行综合技术经济比较，通过分析论证确定，优先采用已有运行经验的型号和线型，采用新制导线和地线时应进行相关试验。地线宜采用铝包钢绞线。当工程需采用 OPGW 时，普通地线选型应与 OPGW 匹配。

一、导线选型

1. 导线选择的依据和条件

大跨越导线方案选择的主要原则如下：

（1）导线载流量应满足线路输送能力的要求；

（2）导线方案应满足电磁环境影响的要求；

（3）具有良好的机械性能；

（4）导线平均运行应力合理控制；

（5）导线制造条件成熟、质量稳定，有施工经验；

（6）导线应有利于防振；

（7）导线应有利于防舞动；

（8）应能满足其他因素（如防腐蚀、施工、运行）要求等。

2. 载流量

大跨越段的导线截面必须与其相连的陆上线路导线截面的输送容量相匹配，不能成为整条输电线路的“瓶颈”。大跨越导线截面按系统极限输送容量选择。

对于确定的环境条件，导线的允许载流量直接取决于其发热允许温度，允许温度越高，允许载流量越

大。但是导线发热允许温度还受导线载流发热后的强度损失制约。架空导线的允许载流量一般是按照一定气象条件下（环境温度、风速、日照强度等）导线不超过某一温度来计算的，目的在于尽量减少导线的强度损失，以保证导线的使用寿命。

在标准状态下，导线的温升是由于发热和散热的热平衡来确定的。热平衡方程式为

$$W_j + W_s = W_R + W_F \tag{12-1}$$

式中 W_j——单位长度导线电阻产生的发热功率，W/m；

W_s——单位长度导线的日照吸热功率，W/m；

W_R——单位长度导线的辐射散热功率，W/m；

W_F——单位长度导线的对流散热功率，W/m。

架空导线载流量的计算公式很多，有日本、苏联、美国及英国等有关部门或人士提供的公式，其中英国摩尔根公式考虑影响载流的因素较多，并有实验基础。但摩尔根公式计算过程较为复杂，在一定条件下将其简化可缩短计算过程，适用于当雷诺数为 100～3000 时，直径 4.2～100mm 导线载流量的计算。载流量计算公式见第三章第二节。

考虑到大跨越杆塔较高，以及水面（海面）开阔风速相应增大的因素，计算载流量时风速采用 $V=0.6$m/s。

3. 电磁环境

与一般线路相同，大跨越工程导线方案的电磁环境应满足规程规范的限值要求。因此需要对参与比选导线方案的电磁环境进行计算，选取合格方案。

计算方法与一般线路相同。

4. 机械性能

对不同导线方案的弧垂、荷载与张力等进行计算，以用于估算铁塔与基础的工程量以及悬垂、耐张串选型，作为导线经济性比较的依据。

需要注意合理控制导线的平均运行应力。大跨越线路由于档距大、悬点高、江（海）面开阔、吸收风能大、激振风速范围宽广、稳流持续时间长、风频范围宽，要求消振系统耗能容量大，需要在全部风振频率范围内将各节点处（线夹、防振装置、间隔棒）的动弯应变控制在允许范围内，这就对导线的抗振性能提出更高要求。一般情况下大跨越线路的导线拉力大，因此，为提高导线自身的抗疲劳能力，需要合理限制导线的平均运行应力。导线平均运行应力的上限，应根据防振措施确定，悬挂点的平均运行应力不应超过抗拉强度的 25%或按运行经验确定。

可以通过计算导线的铝（或铝合金）部应力校验导线平均运行应力取值的合理性。一般而言，应按不同的导线材料的应力分配，使铝或铝合金部分的应力不大于它们各自的疲劳极限。

导线材料的疲劳极限可通过在旋转反复弯曲试验机上进行试验获得，各种试验报告的数据不尽相同，但差别不大，摘录几组数据见表 12-2。

表 12-2 各种导线材料的疲劳极限 kg/mm²

导线材料	疲劳极限		
	数据来源 1*	数据来源 2**	数据来源 3***
硬铝	6.3	6	6～7
耐热铝合金线	6.5	6	
1 号铝合金线	9.3～10	9	
高强度铝合金线		7.5	
高强度耐热铝合金线	7.8	7.5	6.5
镀锌钢线		32	30～36
特高强度镀锌钢线		30	
铝包钢线		6	7～9
硬铜线		10	14～15
铜包钢线		10	9
81-33	10		
81-26	9		
5055	9		9
高强铝镁合金线			8～9
中强铝合金线			7.7
高强度铝包钢			10～12

* 日本“住友电气”100 号，数据为在中村式旋转弯曲疲劳试验机上试验，S-N 曲线疲劳寿命>10^7次通过值。

** 日本电气学会出版物（II）部第 129 号《架空送电线路的微风振动》中的表 5.1，各种导线材料的标准疲劳极限。

*** 《电机工程手册（第二版）》第二章表 1.2-22。

铝合金（或铝）部应力值的简易计算公式如式（12-2）所示。

$$\sigma_a = \frac{T-(\alpha_a-\alpha_s)\cdot t_s A_s E_s}{A_a E_a + A_s E_s} \times E_a \tag{12-2}$$

式中 σ_a——铝合金（或铝）部运行应力，MPa；

α_a——铝合金（或铝）部线膨胀系数，1/℃；

α_s——钢部线膨胀系数，1/℃；

E_a——铝合金（或铝）部弹性模量，MPa；

E_s——钢部弹性模量，MPa；

A_a——铝合金（或铝）部总截面，mm²；

A_s——钢部总截面，mm²；

t_s——使用温度与制造温度的差值，一般取 15℃；

T——导线的张力，N。

5. 经济性比较

电能损耗包括电阻损耗和电晕损耗两部分。一般计算全年的电阻损耗，环境气温取平均温度，此时在一定风速、日照下流过额定电流，计算出导线的温度，再计算此时导线的电阻值，然后再计算电阻损耗。

大跨越可按初投资最小进行经济性比较，也可按年费用最小法进行比较。当需要按年费用最小法对大跨越各种导线方案的经济性进行比较时与一般线路方法一致，具体见第三章第二节。

二、地线选型

地线的作用主要是防止输电线路遭受雷击的侵害，作为地线用的光纤复合架空地线（OPGW），还承担着输电系统通信的角色。大跨越线路的地线要具有足够的热容量、机械强度、耐振与耐腐蚀性能。

大跨越线路的地线既要满足热稳定的要求，也要控制表面场强不超过规范的限值要求。同时大跨越地线选型还要重点选择其机械性能，满足导地线之间的配合要求。

地线通常是单根架设，与多分裂的导线相比微风振动更为严重，为控制地线的动弯应变，应根据工程条件以及地线自身的耐振性能选取地线的平均运行应力，且不宜过大。地线平均运行应力的上限，应结合防振措施确定，悬挂点的平均运行应力不应超过抗拉强度的25%或按运行经验确定。地线的平均运行应力百分数不宜大于导线平均运行应力百分数。

地线的弧垂宜小于导线，并使大跨越档距中央导地线间距满足规程要求，地线的拉力重力比宜大于导线，避免因地线弧垂增大造成地线支架不合理的加高。若两根地线采用的型号不同，其弧垂应匹配。

大跨越工程 OPGW 应优先采用全铝包钢结构的线型，应有足够的耐雷击性能，外层单丝直径不小于3.2mm。

工程未使用过的导线、地线产品及为工程新制的 OPGW 必须提供完整的型式试验报告，并经鉴定合格方能使用。

第四节　绝　缘　配　置

一、绝缘子片数的选择

输电线路绝缘子串长的确定，是塔头尺寸确定及塔头结构设计的基础，直接影响线路工程造价和运行可靠性。根据输电线路外绝缘设计原则，绝缘子片数选择应同时满足工频电压（直流工程的工作电压）、操作过电压和雷电过电压三方面的要求，其中工频电压（直流工程的工作电压）和操作过电压绝缘子片数选择方法与一般线路一致，具体见第三章第八节和第四章第七节。对于直流线路工程，由于直流绝缘子片数选择主要取决于工作电压下的污秽耐压特性，因此，一般是根据污秽性能选定绝缘子片数，再校核计算操作及雷电冲击性能。对于交流线路工程，由于杆塔很高，因此需要按耐雷水平校核反击和绕击条件下所需的绝缘子片数。

大跨越工程的绝缘配合，应使工程能在工频（工作）电压、操作过电压和雷电过电压等条件下安全可靠地运行。

在海拔 1000m 以下地区的大跨越工程，操作过电压和雷电过电压要求下的悬垂绝缘子片数，应不小于表 12-3 的数值。

表 12-3　操作过电压和雷电过电压要求下的悬垂绝缘子最少片数

标称电压（kV）	110	220	330	500	750	1000
单片绝缘子高度（mm）	146	146	146	155	170	195
绝缘子片数（片）	7	13	17	25	32	*39/*43

注　1. 39 片为操作过电压 1.7p.u.=1909kV（中相已考虑 2 片零值）所需要的片数；

2. 43 片为单回路塔全高 60m，冲击接地电阻 15Ω 满足 200kA 耐雷水平所需要的片数。

为保持高塔的耐雷性能，全高超过 40m、有地线的杆塔，高度每增加 10m，应比表 12-3 增加 1 片相当于高度为 146mm 的绝缘子；全高超过 100m 的杆塔，绝缘子片数应根据运行经验结合计算确定。

750、1000、±800、±1100kV 大跨越雷电过电压下所要求的实际绝缘子片数还应根据大跨越雷电过电压计算结果和运行经验确定。

二、空气间隙

根据输电线路外绝缘设计原则，空气间隙选择应同时满足工频电压（直流工程的工作电压）、操作过电压和雷电过电压三方面的要求，其中工频电压（直流工程的工作电压）和操作过电压空气间隙选择方法与一般线路一致，具体见第三章第八节和第四章第七节。由于高塔而增加绝缘子片数时，雷电过电压最小间隙也相应增大。雷电过电压空气间隙应根据本章第五节中防雷计算结果确定。

第五节 防雷和接地

一、防雷计算分析

（一）反击计算方法

防雷反击计算方法介绍如下。

1. 规程法

GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》是用 2.6μs 斜角波进行线路的防雷计算，其对一般线路杆塔（如塔高在 40m 以下时）是可行的，但对于特殊高塔，采用半余弦波头则更符合实际且偏于安全。我国 1959 年《过电压保护规程（适用于 3～220kV 交流电气设备）》附录 4 的计算方法是选取半余弦波形，其陡度为

$$\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}=\frac{I\omega}{2}\sin\omega t=\frac{\pi I}{2\tau_t}\sin\frac{\pi t}{\tau_t} \tag{12-3}$$

式中 I——雷电流幅值（耐雷水平），kA；

τ_t——雷电流波头长度；

t——冲击放电时间，μs。

雷击塔顶时，在杆塔绝缘上的电压 U_I 由以下三个分量组成：流经杆塔的电流在杆塔接地电阻上形成的电压降 U_R；流经杆塔的电流在杆塔电感上形成的电压降 U_L；在导线上感应的电压 U_{iC}。

$$U_I=U_R+U_L+U_{iC} \tag{12-4}$$

$$U_R=\beta iR_{ch}(1-k)=\frac{\beta IR_{ch}}{2}\left(1-\cos\frac{\pi t}{\tau_t}\right)(1-k) \tag{12-5}$$

$$U_L=L_t\frac{h_a}{h_t}\frac{\mathrm{d}(\beta i)}{\mathrm{d}t}-kL_t\frac{\mathrm{d}(\beta i)}{\mathrm{d}t}=\beta\frac{1}{2}L_t\left(\frac{h_a}{h_t}-k\right)\times\frac{\pi}{\tau_t}\sin\frac{\pi t}{\tau_t} \tag{12-6}$$

$$U_{iC}=\frac{a}{2}(h_{av}-kh_{gv})\left(1-\cos\frac{\pi t}{\tau_t}\right) \tag{12-7}$$

$$\beta=\frac{1}{1+\dfrac{L_t}{L_g}+\dfrac{R_{ch}}{L_g}\dfrac{\tau_t}{\pi}\tan\left(\dfrac{\pi t}{2\tau_t}\right)} \tag{12-8}$$

式中 β——杆塔分流系数；

I——雷电流幅值（耐雷水平），kA；

τ_t——雷电流波头长度，雷电流最大陡度取 50kA/μs，故 $\tau_t=\pi I/100$；

k——导线与地线间的耦合系数；

R_{ch}——杆塔冲击接地电阻，Ω；

L_t——杆塔电感，可根据试验及实测数据选取，高杆塔亦可取 0.55～0.6μH/m；

h_a——导线横担高度，m；

h_t——杆塔总高度，m；

h_{av}——导线的平均高度，m；

h_{gv}——地线的平均高度，m；

a——感应过电压系数；其值等于随雷电流幅值 I 而变化的系数，$a=0.1I+10$；

t——冲击放电时间，μs。

根据要求的耐雷水平 I，按式（12-4）～式（12-8）计算出不同时间的 U_R、U_L、U_{iC} 及 U_I，如图 12-1 所示。

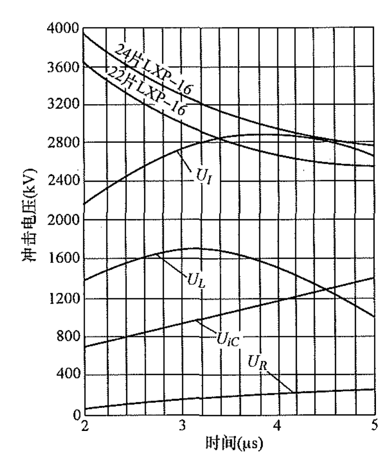


图 12-1 塔头绝缘选择曲线

图 12-1 中画出 U_I–t 曲线后，再根据绝缘子的伏秒特性，在图中画出不同片数绝缘子的伏秒特性曲线。由 U_I–t 曲线与绝缘子伏秒特性曲线相切点，即可确定所需绝缘子片数。如图 12-1 所示，选用 22 片 LXP-16 不够，选用 24 片 LXP-16 正好，故选用 24 片 LXP-16。

绝缘子的伏秒特性可根据有关试验数据选取（+1.5/40μs），若无恰当数据，亦可将拟选用的绝缘子型式及片数，按高度折算成 146mm×254mm 标准绝缘子片数查长绝缘子串正极性雷电冲击闪络电压曲线（见第三章第八节）。

2. EMTP 法

在线路防雷计算和其他过电压计算中，一般都需要进行暂态过电压的数值模拟，目前使用较多的模拟计算软件有 EMTP 等程序，在仿真时考虑了波在传播过程中的畸变、折反射、绝缘子串击穿的物理过程、杆塔结构对波传播过程的影响等因素，从而为电力系统雷电过电压的数值分析提供了有效的手段，得到了广泛的使用。该方法也应用于一般线路防雷计算，根据 GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》附录 D 中规定，计算时宜考虑导线上工频电压的影响、雷击塔顶时导线上的感应电压，杆塔宜采用分段波阻抗模拟。

线路绝缘闪络判据可采用相交法或先导发展模型

法。相交法认为电压波 $U_{0(t)}$和绝缘冲击放电伏秒特性 $U_{i(t)}$曲线相交则判断为闪络。但是，根据伏秒特性曲线的规定（放电时间与施加电压峰值的曲线），波前放电时，$U_{0(t)}$和 $U_{i(t)}$是相交的；波尾放电时，两者是不相交的。因此，采用相交法有可能丢失波尾放电的次数。先导发展法，近年来，随着科学技术的发展和高速照相机的广泛应用，对长空气间隙放电过程的研究也越来越深入，先导发展法是在此基础上开始和发展的。目前，美国电科院（EPRI）、日本东京电力公司（TEPCO）等根据这些试验研究采用先导模型来判断雷击时绝缘子串和空气间隙的闪络。先导发展法的核心思想是：当线路绝缘上电压出现的时间达到一定的流注发展时间时，先导开始发展，其速度随施加的瞬时电压与剩余间隙长度而变。当流注占满整个间隙长度时，间隙即闪络。该方法理论上比较符合放电的物理过程，能判断任何波形下绝缘间隙的闪络。

（二）绕击计算方法

线路运行经验、现场实测和模拟试验均证明，雷电绕击导线的概率和地线与导线的布置、保护角、杆塔高度以及线路经过地区的地形、地貌、地质条件有关。目前我国用于输电线路雷电绕击导线性能的评估方法，主要有电气几何模型法（EGM）和先导发展模型法（LPM）等，现大跨越计算推荐采用 GB/Z 24842—2009《1000kV 特高压交流输变电工程过电压和绝缘配合》附录 B 和 GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合接地设计规范》附录 D 推荐的电气几何模型法（EGM），其计算方法与一般线路相同，具体见第三章第九节。

（三）防雷指标

线路档距中央导线与避雷线间的距离，按雷击档距中央避雷线不致反击到导线来确定。对于 110～750kV 架空输电线路大跨越工程，DL/T 5485—2013《110kV～750kV 架空输电线路大跨越设计技术规程》规定：塔头上两根地线的距离，不应超过地线与导线间垂直距离的 5 倍；气温＋15℃，无风、无冰时，档距中央导线与地线的距离宜按式（12-9）和式（12-10）计算，并选其较小者；对发电厂、变电站进线段内的大跨越档，导线与地线间的距离必须符合式（12-10）的要求。

$$S \geqslant 0.012L+1 \tag{12-9}$$

式中 S——导线与地线间的距离，m；

L——档距长度，m。

$$S \geqslant 0.1I \tag{12-10}$$

式中 I——档距中央的耐雷水平，kA，采用表 12-4 所列数值。

表 12-4　110～750kV 架空输电线路大跨越档距中央的耐雷水平

额定电压（kV）	110	220	330	500	750
耐雷水平（kA）	120	120	150	175	175

为防止雷击档距中央地线时反击，GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合接地设计规范》规定大跨越档导线与地线间的距离不得小于表 12-5 所列数值。

表 12-5　110～220kV 防止反击要求的大跨越档导线与地线间的距离

额定电压（kV）	110	220
距离（m）	7.5	11.0

DL/T 5504—2015《特高压架空输电线路大跨越设计技术规定》规定：特高压大跨越档为防止雷击档距中央地线时反击导线，气温＋15℃，无风、无冰时，档距中央导线与地线的距离宜按式（12-11）或式（12-12）和式（12-13）计算，并选其较小者。对发电厂，变电所进线段内的大跨越档，导线与地线间的距离必须符合式（12-10）的要求。

1000kV 交流输电线路：

$$S \geqslant 0.015L+\sqrt{2}U_{m}/\sqrt{3}/500+2 \tag{12-11}$$

±800kV 直流输电线路：

$$S \geqslant 0.015L+U_{m}/500+2 \tag{12-12}$$

式中 U_m——最高运行（工作）电压，kV；

S——导线与地线间的距离，m；

L——档距长度，m。

对于特高压架空输电线路大跨越工程，GB/Z 24842—2009《1000kV 特高压交流输变电工程过电压和绝缘配合》规定：在一般土壤电阻率地区（500Ω·m 及以下），1000kV 线路的反击耐雷水平不宜低于 200kA。因此 1000kV、±800kV 大跨越工程的反击耐雷水平不宜低于一般线路。同时 GB/Z 24842—2009 要求变电站 2km 架空进线段范围内反击耐雷水平宜不小于 250kA，因此要求对发电厂、变电站进线段内的特高压大跨越工程反击耐雷水平不宜低于 250kA。

大跨越线路的耐雷性能除了耐雷水平指标外，更重要的是线路雷击跳闸率。跳闸率高，意味着线路发生雷击跳闸的概率高，因此更受到人们的关注。需分别计算大跨越线路的雷击反击跳闸率与雷击绕

击跳闸率，二者之和为总的雷击跳闸率。对大跨越线路，以“次/（100km·a）”衡量线路的雷击跳闸率时，需按大跨越档实际长度进行计算。俄罗斯对架空线路大跨越段的防雷保护要求是：考虑开展预防性试验和检修工作的困难，大跨越杆塔绝缘闪络造成雷击跳闸绝对次数应能保证大跨越档绝缘子串检修间隔不少于 25 年。对特高压大跨越线路可采用安全运行年数或雷击无故障时间来衡量，即按大跨越的实际线路长度计算多少年内出现一次雷击跳闸。GB/Z 24842—2009《1000kV 特高压交流输变电工程过电压和绝缘配合》和 GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合接地设计规范》要求大跨越档在雷电过电压下安全运行年数不宜低于 50 年。

（四）大跨越档的保护

考虑到大跨越工程比一般线路工程重要，故 GB/Z 24842—2009《1000kV 特高压交流输变电工程过电压和绝缘配合》和 GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合接地设计规范》规定：大跨越杆塔的地线保护角宜小于一般线路的保护角，另 110～750kV 交流大跨越宜安装线路避雷器，以提高安全水平和降低综合造价。

DL/T 5485—2013《110kV～750kV 架空输电线路大跨越设计技术规程》规定：跨越段应架设双地线，跨越塔上地线对边导线的保护角应符合以下要求：

（1）单回路，330kV 及以下线路的保护角不宜大于 15°，500～750kV 线路的保护角不宜大于 10°；

（2）同塔双回或多回路，110kV 线路的保护角不宜大于 10°，220kV 及以上线路的保护角均不宜大于 0°。

DL/T 5504—2015《特高压架空输电线路大跨越设计技术规定》规定：跨越塔上地线对边导线的防护宜采用负保护角。

二、接地

线路的杆塔接地装置主要是为了导泄雷电流入地，以保证线路有一定的耐雷水平。

DL/T 5485—2013《110kV～750kV 架空输电线路大跨越设计技术规程》和 DL/T 5504—2015《特高压架空输电线路大跨越设计技术规定》规定，大跨越杆塔接地装置应按以下要求进行设计。

（1）大跨越杆塔的接地，应采用逐腿接地方式，接地体引下线的截面积应不小于 70mm²，接地体应镀锌；在接地体的搭接处，应进行防腐处理。

（2）大跨越杆塔接地电阻不应超过表 12-6 数值。

表 12-6　大跨越杆塔接地电阻

土壤电阻率（Ω·m）	≤100	100～500	500～1000	1000～2000	＞2000*
工频接地电阻（Ω）	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0

* 如土壤电阻率大于 2000Ω·m、接地电阻很难降到 15Ω 时，工频接地电阻也不宜大于 20Ω。

其他接地设计相关内容详见第三章第九节。

第六节　绝缘子串及金具

大跨越工程的绝缘子串及金具是在一般线路基础上考虑工程重要性和工程实际情况而特殊设计的绝缘子串及金具。

一、绝缘子串

绝缘子串的强度配置由工程中正常工况出现的最大荷载控制，不应由事故工况控制，串型配置要经济合理，尽量简化。

1. 绝缘子机械强度的安全系数

考虑到大跨越工程的重要性，DL/T 5485—2013《110kV～750kV 架空输电线路大跨越设计技术规程》和 DL/T 5504—2015《特高压架空输电线路大跨越设计技术规定》规定：绝缘子的机械强度安全系数应不小于表 12-7 的数值，双联及以上的多联绝缘子串应验算断一联后的机械强度，其荷载及安全系数按断联情况考虑。

表 12-7　绝缘子的机械强度安全系数

情况	安全系数	
	盘型绝缘子	棒型绝缘子
最大使用荷载	3.0	3.3
断线、断联情况	2.0	2.0
验算情况	1.5* 1.8**	1.5
年平均气温情况	5.0	5.0

注　DL/T 5504—2015《特高压架空输电线路大跨越设计技术规定》仅对盘形绝缘子进行了规定。

*　数据源自 DL/T 5485—2013。

**　数据源自 DL/T 5504—2015。

绝缘子的机械强度安全系数按式（12-13）计算。

$$K = T/T_{\max} \tag{12-13}$$

式中　T ——绝缘子的额定机械破坏荷载，kN；

T_{max} ——分别取绝缘子承受的最大使用荷载、断线、断联、验算荷载或常年荷载，kN。

常年荷载是指年平均气温条件下绝缘子所承受的荷载。验算荷载是验算条件下绝缘子所承受的荷载。断线的气象条件是无风、有冰、–5℃。绝缘子串每串不得少于两联，断联的气象条件：①非特高压大跨越是无风、无冰、最低气温月的最低平均气温；②特高压大跨越是无风、有冰、–5℃。

2. 绝缘子串数的确定

绝缘子串数的确定与一般线路方法一致，具体见第七章第二节，安全系数需满足表 12-7 的规定。

二、金具

线路金具尽量降低单件质量和尺寸，便于运输和安装；使用高强度材料应重点考虑材料的延展性，避免脆断；采用成熟的技术、成熟的材料和成熟的加工工艺；尽量简化金具结构、减少金具数量；金具的互换性要强，便于线路的维护；金具受力分配均匀、合理，满足线路运行出现的各种荷载要求。绝缘子金具串安装前应进行试组装。

1. 金具的安全系数

考虑到大跨越工程的重要性，DL/T 5485—2013《110kV～750kV 架空输电线路大跨越设计技术规程》和 DL/T 5504—2015《特高压架空输电线路大跨越设计技术规定》规定：绝缘子的机械强度安全系数应不小于表 12-8 的数值。

表 12-8　金具的机械强度安全系数

情况	安全系数
最大使用荷载	3.0
断线、断联情况	2.0
验算情况	1.5* 1.8**

*　数据源自 DL/T 5485—2013。

**　数据源自 DL/T 5504—2015。

2. 挂线点金具的选择

杆塔上悬挂导线和地线的部位称为挂线点。选择挂线点时，必须将与其连接的金具包括在内，两者应一并考虑。挂线点受力较为复杂，国内早期运行经验已经证明这一金具不可采用可锻铸铁制造的产品，在选择第一个金具时，应从强度、材料、型式三方面考虑。国外对此金具也有特殊考虑的事例，加拿大 BC 省水电局是采取加大一个强度等级的措施；日本则通过疲劳、磨损等试验对各种金具型式进行选择；意大利设计了一种两个方向的回转轴心基本上在同一个平面上的金具（即现国内使用的 GD 挂板），使得两个方向转动都较灵活。DL/T 5485—2013《110kV～750kV 架空输电线路大跨越设计技术规程》和 DL/T 5504—2015《特高压架空输电线路大跨越设计技术规定》规定：与横担连接的第一个金具应转动灵活且受力合理，其强度应高于串内其他金具强度。根据多年的运行经验，推荐如图 12-2、图 12-3 所示常用的挂点金具。

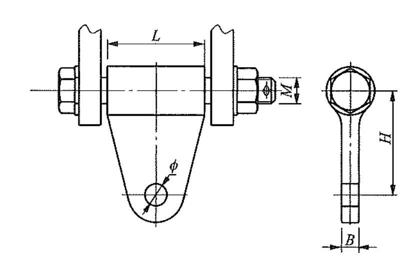


图 12-2　EB 挂板

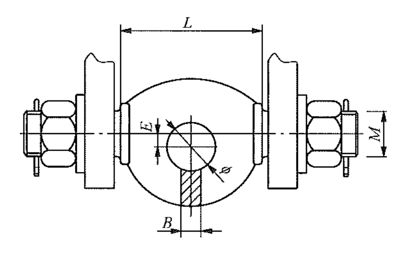


图 12-3　GD 挂板

图 12-2 和图 12-3 中的 EB 和 GD 挂板现常用于我国大跨越工程设计中，EB 和 GD 挂板往往用于跨越塔悬垂串上，GD 挂板用于锚塔耐张串上。

3. 悬垂线夹

（1）导线悬垂线夹。导线悬垂线夹的选型是大跨越金具设计中首先需要考虑的问题，悬垂线夹有滑动线夹、有限握力线夹、固定线夹等型式。滑动线夹仅在早期的大跨越工程中采用过。有限握力线夹大多在我国 20 世纪 80 年代中期以前设计的 500kV 大跨越中使用，之后大跨越工程绝大多数采用固定线夹，个别采用有限握力线夹，90 年代后期开始基本不再采用。滑动线夹在达到规定的最大握力之前，导线在线夹内出现滑动，大多用于单导线，其结构复杂且可靠性差。有限握力线夹在规定的握力最小值与最大值之间时，导线在线夹内出现滑动。固定线夹在达到规定的最小握力之前，导线不能在线夹内出现滑动。早期工程采用滑动线夹与有限握力线夹主要为了降低直线塔的纵向不平衡张力。

相比固定线夹，滑动线夹与有限握力线夹必须配备一整套释放型防振装置，要求防振装置有可靠的释放性能并要有一定的强度，保证不误动作，这些释放防振装置往往给运行带来麻烦，消振性能也不及固定型好，特别是分裂导线还必须配置释放型间隔棒。此

外，线夹处导线位置不固定，其形状有时弯曲有时被拉直，受力条件不好，导线必须考虑附加的弯曲应力；滑动线夹与有限握力线夹尺寸很大，不易布置，制造复杂，需要特殊设计。固定线夹自从导线装入线槽，形状就不再改变，线夹的曲率半径即使小一些，导线线股由于永久变形，应力将重新分配，运行经验证明，这种分配是可以接受的，并且固定线夹对防振装置没有特殊要求，尺寸合理，制造简单，安装方便。因此，大跨越应首先考虑选用固定线夹。

导线悬垂线夹示例如图 12-4～图 12-6 所示。

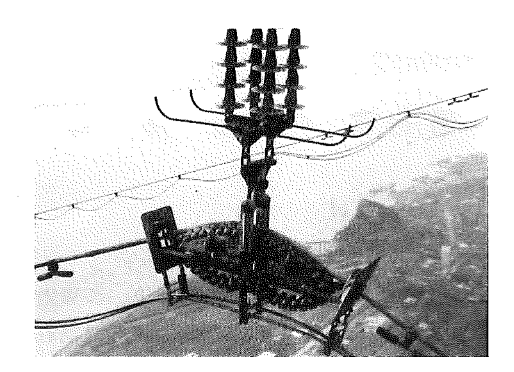


图 12-4 履带式滑动线夹

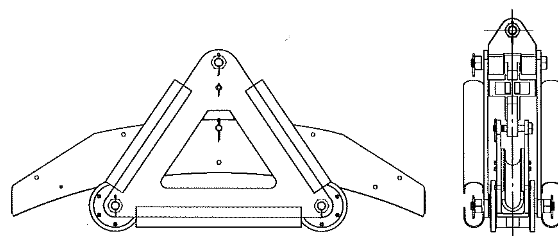


图 12-5 滚筒式滑动线夹

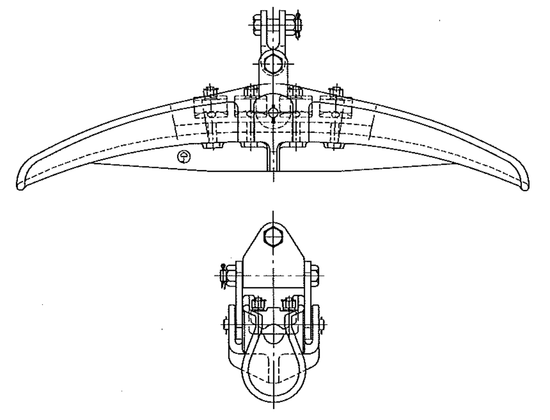


图 12-6 船型固定线夹

（2）地线悬垂线夹。大跨越地线悬垂线夹与导线悬垂线夹选择方法一致，现宜选用固定线夹。

（3）OPGW 悬垂线夹。大跨越工程用 OPGW 悬垂线夹的一种常用形式是双悬垂预绞式线夹，如图 12-7 所示，这种线夹包括一定数量的护线条、预绞丝，氯丁橡胶制成的衬垫（两片）以及两个悬垂夹体。橡胶内衬包裹住缠有护线条的 OPGW 悬垂线夹上，外层预绞丝从外面包裹住橡胶内衬，铝合金夹体在最外层，它起到锁紧护线条装置的作用，并有效地防止光缆的轴向移动。此种线夹的缺点是它的握力小于船式线夹的握力。

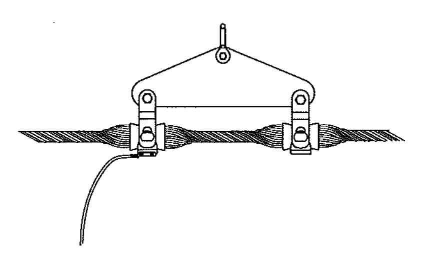


图 12-7 双悬垂预绞式线夹

另一种常用的是船式悬垂线夹，也就是提包式悬垂线夹，如图 12-8 所示。这种线夹的技术特点是：①具有比较好的机械强度；②对导线具有一定的握力；③线槽具有一定的曲率半径，能够降低导线的弯曲应力和比较好的降低由于振动对 OPGW 悬垂线夹造成的应力损伤；此种悬垂线夹船体通常是用铝合金材料制造。常用于铝骨架式 OPGW。

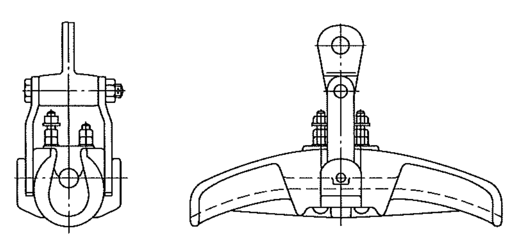


图 12-8 提包式悬垂线夹

第三种常用的是悬垂—双耐张线夹，即两个预绞式耐张线夹通过一个三角联板用作一个悬垂线夹，如图 12-9 所示。这种线夹有以下特点：①对 OPGW 具有足够的握力；②可以满足 30°以上的悬垂角的要求；③对直线塔的要求与一般悬垂串相同；此种形式常用于铝管式 OPGW 悬垂线夹。

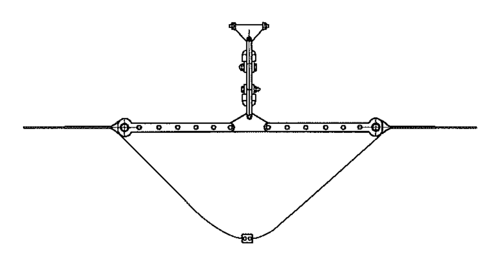


图 12-9 悬垂—双耐张线夹

OPGW 的悬垂线夹选择应根据工程情况、悬挂点局部弯曲引起附加应力及 OPGW 悬垂线夹具体型式确定。

4. 耐张线夹

（1）导地线耐张线夹。耐张线夹的选型与导地线型式很有关系。早期大跨越采用过铅注式、牛耳式的耐张线夹，二者均可进行弧垂调整。在大跨越开始大量采用标准钢芯铝绞线后，迄今为止几乎所有的导线型式都采用压缩型耐张线夹。大跨越耐张线夹基本采用压缩型线夹，如图 12-10 所示。

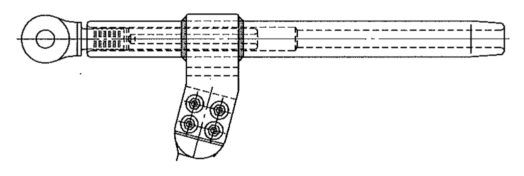


图 12-10　压缩型耐张线夹

（2）OPGW 耐张线夹。OPGW 悬垂线夹的耐张线夹一般有双预绞丝式耐张线夹、U-bolt 耐张线夹和楔形线夹几种型式。

双预绞丝式耐张线夹如图 12-11 所示，它的预绞丝一般由 5 根或更多螺旋状的金属丝组合而成，并在组合体的内表面附有细小且均匀的金刚砂，以增大接触面的摩擦系数。通过嵌环来保护预绞丝环状末端，使其不受磨损。由于沿 OPGW 悬垂线夹的环向压力被分布到了较大的接触面积上，此种线夹目前常用于层绞式 OPGW 悬垂线夹。

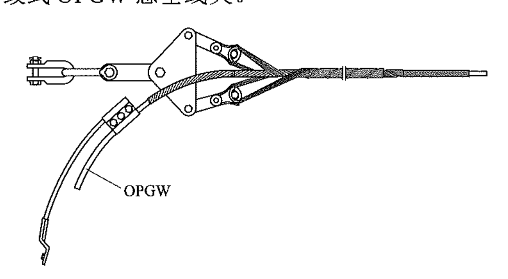


图 12-11　双预绞丝式的耐张线夹

U-bolt 耐张线夹如图 12-12 所示，其由开槽的线夹体、夹持线条与楔子组成。夹持线条与楔子、线夹体相连，它将轴向力和压应力分布到 OPGW 悬垂线夹一个比较长的区域上。此种线夹的缺点是对施工工艺要求比较严格，通常需使用测力扳手按规定扭矩紧固螺栓。日前常用于层绞式 OPGW 悬垂线夹。

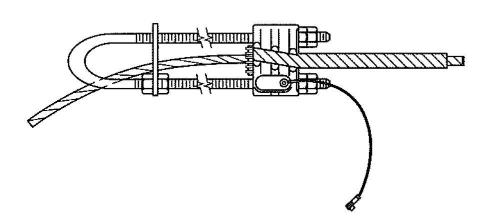


图 12-12　U-bolt 耐张线夹

楔形线夹如图 12-13 所示，此种线夹对 OPGW 悬垂线夹有比较大的挤压力，目前常用于铝骨架式 OPGW 悬垂线夹。

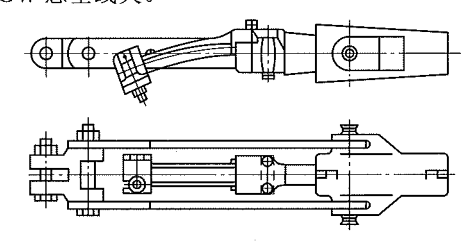


图 12-13　楔式耐张线夹

OPGW 悬垂线夹的耐张线夹应根据工程中 OPGW 悬垂线夹的具体型式优化确定。以上型式供参考。

第七节　防　振　防　舞

一、防振设计

1. 理论基础

大跨越线路防振基于能量平衡理论，即风对导线系统输入的能量与电线系统处于振动状态时消耗的能量相等，此时电线系统处于稳定的状态。电线系统的耗能包括电线自身耗能（电线自阻尼耗能）和防振方案耗能（防振锤、阻尼线等阻尼耗能 2 部分），能量平衡可由式（12-14）表示。

$$P_W = P_d + P_c \tag{12-14}$$

式中　P_W——风输入的能量；

P_d——防振方案耗能；

P_c——电线自阻尼耗能。

当输入风能大于电线系统消耗能量时，振幅增大，反之减小。

2. 大跨越工程电线的防振

大跨越工程档距大、电线悬挂点高、地形开阔，电线张力大（T/m 大），水面上空容易形成层流风且引起电线激振风速的范围广，电线吸收风能较一般线路大得多，更容易受激产生振动，具有振动强度大、振动频率范围宽、振动持续时间长的特点，因此，需重视电线的防振设计，有效限制电线的振动强度。对同一种电线型式，应用于大跨越和一般线路的要求不同，对大跨越更加严格，国内电线的动弯应变容许值一般沿用表 12-9 所列数值。

表 12-9　国内电线动弯应变容许值　με

电线类型	动弯应变容许值	
	大跨越线路	一般线路
钢芯铝绞线	±100	±150
铝包钢绞线	±150	±200

续表

电线类型	动弯应变容许值	
	大跨越线路	一般线路
钢芯铝合金绞线	±120	±150
全铝合金绞线	±120	±150
镀锌钢绞线	±200	±300

大跨越线路的防振方案必须有很好的消耗能量的特性，并且在需要保护的微风振动整个频域内，能将各夹固点的动弯应变均控制在安全范围以内，通常有β阻尼线、β阻尼线加防振锤、双β阻尼线、交叉阻尼线、圣诞树阻尼线、防振锤组合等型式，各方案示意如图12-14所示。目前国内大跨越首选β阻尼线加防振锤；另外，在各线夹夹固点安装护线条、对分裂导线安装阻尼间隔棒也具有良好的防振作用。设计出具体的防振方案后一般需通过模拟试验对其进行验证、调整和优化，并通过现场测振来验证防振方案的效果。

3. 阻尼线的防振特性

阻尼线一般是用弯曲刚度小、易谐振的轻型电线形成花边状悬挂在悬挂点两侧电线上，如同多个防振锤联合防振。如图12-14所示，其型式多样，若选配

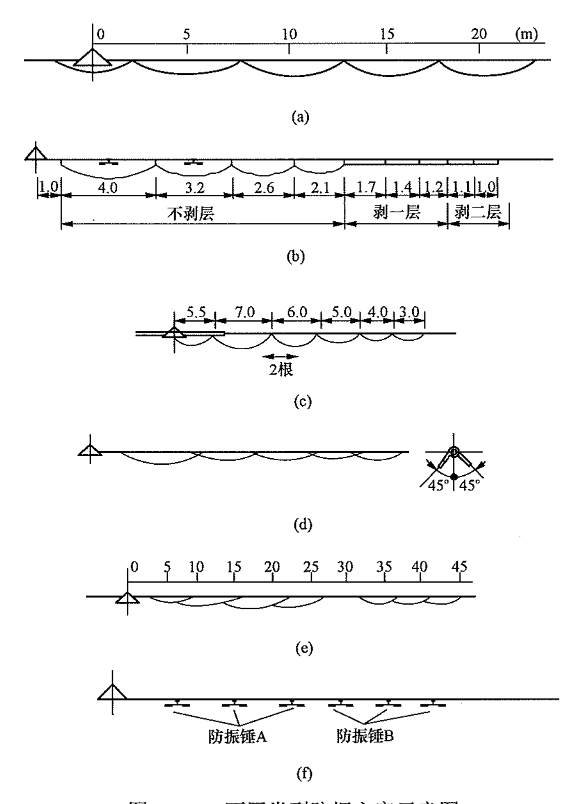


图12-14　不同类型防振方案示意图

（a）β阻尼线；（b）β阻尼线加防振锤；（c）双β阻尼线；（d）交叉阻尼线；（e）圣诞树阻尼线；（f）防振锤组合

适当，可获得较宽的频率特性，适用于大跨越档内导线、地线的防振。挪威、意大利、日本及澳大利亚等国使用阻尼线最多最早，我国自20世纪60年代也开始在大跨越的导线、地线上安装阻尼线。对仅装阻尼线的跨越工程，运行中反映其低频防护效果还不理想，出现过阻尼线最外侧节点（或线夹）处产生电线断股情况。因此，后来又发展采用阻尼线和防振锤的联合保护方式，起到两种消振装置的取长补短作用。我国常用的如图12-14中的（b）型。

阻尼线是一个极为复杂的消振体系，迄今为止还没有比较完整的、有系统的设计理论和计算方法，往往通过一些定性分析和试验来确定阻尼线的最佳结构型式。阻尼线是通过各个节点与导线连接，在节点处阻尼线对导线的作用相当于一个防振锤，故要求阻尼线的各节点应尽量设置在振动波形的波腹处，以获得最佳的消振效果。但阻尼线的相邻节点之间又是相互联系的，阻尼线的消振作用又取决于导线振动时，相邻的两个节点能产生最大的相对变位，从而使花边在振动时消耗更多的能量。因此，阻尼线的性能与多个防振锤的情况相似，而相互之间又有联系作用。阻尼线采用的绞线对消振效果有影响，要适当地选择绞线的规格、结构及材料。随着大跨越档距的增大，要求阻尼线的消耗能量增加及保护的频谱范围扩大，增加阻尼线的总长度、节点数目及改变布置型式，在一定程度上可以适应此项要求。但是增加阻尼线的总长度及节点数目是有限度的，正像防振锤的安装数量也不能无限制地增加一样，采用防振锤与阻尼线的联合保护是解决这个问题的有效方法之一。

4. 阻尼线的设计要点

一些运行经验证实效果良好的阻尼线结构类型，往往为新设计阻尼线提供借鉴，并可提前在试验室内进行试验和优化，线路建成后的测振将作为防振设计鉴定的依据。

（1）阻尼线各花边长度的确定。阻尼线花边长度变化可分为等长、递减和递增等方式，但对大跨越多花边的（b）型（见图12-18）均采用递减型，从档端侧至档中侧顺序消耗低频、中频、高频的振动能量。各花边的长度是根据档距长度、电线直径、风速及振动频谱范围等因素确定的，小花边保护高频，中花边保护中频，大花边及防振锤保护低频。大直径电线比直径小的电线的振动频率低，花边长度要相对长些。《500kV线路大跨越分裂导线防振试验研究》中介绍，在长花边内的导线上可加装防振锤以弥补低频防护的不足，并且可以把防振锤夹头振幅减小到安全范围以内；防振锤不宜装在阻尼线的外侧，以避免外侧有防振锤时对高频波有较大的反射作用；长花边不宜超过4m，短花边可以短至0.5m。在确定花边长度时，应以

阻尼线的综合保护效果最佳为原则，要求阻尼线的各节点设置在振动波的波腹附近，所布置的各节点能兼顾到全部危险振动频谱范围，使之不存在无保护的空白区。阻尼线的总长与档距长成比例地增加。

（2）阻尼线沿长度的变化。阻尼线节点离开悬挂点愈远处、阻尼线所加给导线的质量越轻为宜，以利于波的传播，防止在远端形成振动节点而导致断股。为此除按递减设置花边长度外，还可采用绞线规格不同或者用单、双根阻尼线（或用单导线和其剥层轻线）的措施。如图 12-18 中图（a）虽采用等长花边，但最外端的花边可选用质量轻的绞线；图（b）对中外侧花边（小花边侧）进行剥一层及剥二层的处理；图（e）外端三个一体的花边采用较轻的绞线等。

（3）邻近悬挂点第一个阻尼线节点的位置。考虑方法有多种，其一是仿效防振锤的安装距离来计算，一般取最小半波长的 0.5～0.9 倍；其二是按低频最危险振动风速（如 1.5～1.77m/s）下的波腹$\lambda/4$来计算。

（4）阻尼线花边的弧垂。阻尼线的花边弧垂对阻尼线的自振频率有一些影响，但对消振效果影响不大。因此通常取为花边长度的$\dfrac{1}{6}\sim\dfrac{1}{10}$或取 0.5～1.0m。

（5）阻尼线节点夹固方式。过去对阻尼线的节点夹固方式多采用与电线外层相同材质的单股线将阻尼线与电线缠绕在一起，运行中发现缠绕点有断股现象。目前多改用导线外面先加预绞丝护线条，后安装带有阻尼橡胶垫的专用阻尼线线夹，阻尼线线夹应质量轻。

二、防舞设计

防舞设计内容与一般线路一致，见第五章第六节。特别的，考虑大跨越的重要性，建议在非舞动地区也采取抗舞设计，即塔头布置校验舞动时运行电压要求的空气间隙值，并适当考虑导线发生舞动时的附加舞动荷载，对重要联结部件按动荷载验算疲劳强度。

第八节　杆塔和基础

一、跨越塔塔头布置

跨越塔塔头除满足各种电气间隙要求外，还需满足水平和垂直距离的要求。

1. 水平线间距离

为了避免导线与导线间放电，DL/T 5485—2013《110kV～750kV 架空输电线路大跨越设计技术规程》和 DL/T 5504—2015《特高压架空输电线路大跨越设计技术规定》对水平线间距离进行了规定，同一回路导线的水平线间距离，档距在 1000～2500m 时，按档距中导线接近条件考虑，用式（12-15）计算。

$$D=0.4L_K+K_U\cdot U/110+K\sqrt{f}+A \quad (12\text{-}15)$$

式中　D——导线水平线间距离，m。

L_K——悬垂绝缘子串长度，m。

U——线路电压，对于交流线路取标称线电压、对直流线路取导线对地标称电压，kV。

K_U——系数，对于交流线路，$K_U=1.0$；对于直流线路，$K_U=\sqrt{2}$。

K——系数，110～750kV 线路取 0.75～0.95；特高压线路取 0.8～1.0。

A——增大系数，对于 110～750kV 线路 $A=0$；对于 1000kV 交流线路和±800kV 直流线路，10～15mm 覆冰 $A=0$，20mm 覆冰 $A=0.5$m。

f——导线最大弧垂，m。

大跨越工程为避免下层导线脱冰后对上层导线或地线放电，DL/T 5485—2013《110kV～750kV 架空输电线路大跨越设计技术规程》和 DL/T 5504—2015《特高压架空输电线路大跨越设计技术规定》要求上、下导线间及导线与地线间的水平偏移应进行校验。按导线和地线不均匀脱冰时，跳跃接近及静态接近情况下，不致发生导线间和导线与地线间的危险接近，并应符合如下规定：① DL/T 5485—2013《110kV～750kV 架空输电线路大跨越设计技术规程》要求上、下导线间及导线与地线间的水平偏移见表 12-10，对设计冰厚为 5mm 或无冰的大跨越，可根据运行经验适当减小；② DL/T 5504—2015《特高压架空输电线路大跨越设计技术规定》要求上、下导线间及导线与地线间的水平偏移不宜小于 1m（无冰区的大跨越，可根据运行经验适当减小）。

表 12-10　导线间或导线与地线间的最小水平偏移　　m

额定电压（kV）		110	220	330	500	750	1000
设计冰厚（mm）	10	0.75	1.25	1.75	2.25	2.50	1.00
	15	1.00	1.75	2.25	2.75	3.50	

2. 垂直距离

导线垂直排列的垂直线间距离，采用同一回路水平线间距离的 75%，并满足上层导线及其金具带电部分至下层横担构件的最小空气间隙所要求的距离。110～750kV 架空输电线路大跨越工程同时不应小于表 12-11 所列数值。

表 12-11　最小垂直线间距离

额定电压（kV）	110	220	330	500	750
最小垂直线间距离（m）	3.5	5.5	7.5	11.0	12.5

3. 其他要求

（1）导线三角排列的等效水平线间距离参照一般线路规定。

（2）双回路塔上，不同回路的不同相导线间的水平或垂直距离应再增大 0.5m。

（3）在易舞区，塔头布置应按舞动时运行电压要求的空气间隙进行校验。

二、跨越塔塔型选择

大跨越的塔高、荷载大、结构复杂、耗钢量大，塔型选择应结合占地范围、杆塔材料、工程投资大小、运行维护、施工方法、制造工艺等因素，在充分进行设计优化的基础上选取技术先进，经济合理的设计方案。目前国内常用的大跨越塔根据结构形式、杆塔材料分为拉线塔、独立式钢筋混凝土塔、自立式组合构件铁塔、自立式钢管塔和自立式钢管混凝土塔等。

1. 拉线跨越塔

带拉线的大跨越塔我国在 20 世纪 70 年代具有成功的应用经验，如某 220kV 大跨越工程（见图 12-15）等。拉线塔柱身断面小，铁塔自身风荷载大大小于自立式铁塔，且拉线塔可充分发挥拉线抗拉能力大的特性而减小耗钢量，因此拉线大跨越塔具有显著的经济意义，且塔身部分自上而下多为同一尺寸，为加工和施工带来方便。但由于拉线塔的拉线布置需要占用较大的空间，近年来一般不采用拉线跨越塔。

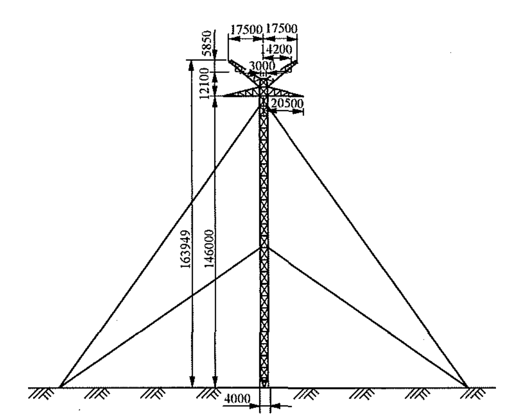


图 12-15　某 220kV 大跨越工程拉线跨越塔

2. 独立式钢筋混凝土跨越塔

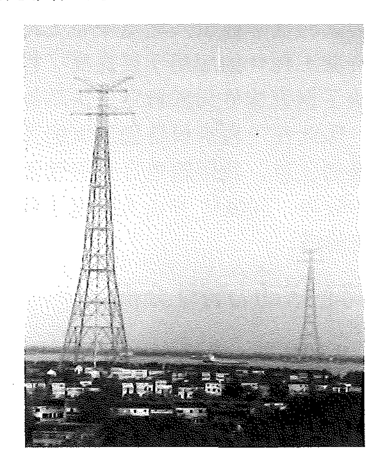
独立式钢筋混凝土塔（见图 12-16）在我国早期大跨越工程中应用较为广泛。如 500kV 大胜关长江大跨越，500kV 平洛淮河大跨越工程等。新中国成立初期由于我国经济实力较弱，钢材产量低，价格较高，为了节约钢材，钢筋混凝土跨越塔是国内主要的大跨越塔型之一。伴随着我国国民经济的快速发展，钢铁产量的逐年提高，钢材价格大幅降低，而人工费等其他间接费用的加大，使得钢筋混凝土塔在造价上失去优势，再加上由于钢筋混凝土塔自重较大，基础工程量也大，从而增加了基础本体工程的造价，目前国内已鲜有新建的钢筋混凝土跨越塔工程。



图 12-16　某 500kV 大跨越工程钢筋混凝土跨越塔

3. 自立式组合构件跨越塔

自立式组合构件跨越塔是指采用角钢或钢板焊接拼合成组合截面（如十字形、T 形、方形）的构件作跨越塔主要受力构件的铁塔形式。自立式组合构件跨越塔在国内外具有较多的工程经验，如德国的 380kV 易北河（Elbe）大跨越，意大利的墨西那（Messina）大跨越等，我国 500kV 镇江大跨越、500kV 珠江大跨越工程及 500kV 江阴长江大跨越工程等，如图 12-17 所示。组合构件跨越塔结构材料来源广泛方便，加工和施工工艺都与一般铁塔相同，对加工设备的要求较低，且铁塔加工一般在流水线上作业，加工质量有保障，构件的单件质量较轻，便于加工、运输和安装，因而使用较为广泛。



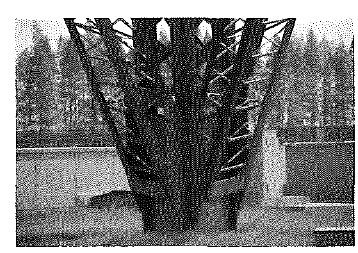


图 12-17　某 500kV 大跨越工程组合构件跨越塔

4. 自立式钢管跨越塔

自立式钢管塔是近年来应用最为广泛的跨越塔塔型方案，钢管塔主要受力构件均采用钢管构件，具有体型系数小、断面特性优、经济指标先进的优势。国内首先使用钢管结构跨越塔是220kV南京燕子矶夹江大跨越工程。20世纪90年代以来钢管塔因其经济性优势成为大跨越工程首选结构形式，如图12-18所示。500kV吴淞口黄浦江大跨越、500kV崇明长江大跨越、±500kV芜湖长江大跨越、500kV马鞍山长江大跨越、1000kV皖电东送长江大跨越工程等均采用了钢管跨越塔。

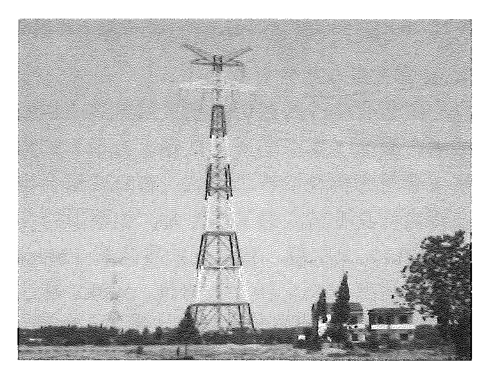


图12-18　某500kV大跨越工程钢管跨越塔

5. 自立式钢管混凝土跨越塔

随着输电技术迅猛发展，大跨越工程的跨距、塔高及荷载越来越大，钢管混凝土跨越塔因其复合构件承载力大的优点被引入输电线路大跨越工程中来。钢管混凝土构件的应用不仅提高了构件的承载力，也解决了钢管构件局部稳定、铁塔加工层状撕裂等问题，因此在工程规模特别巨大的大跨越工程中具有明显的优势，我国输电行业钢管混凝土构件的应用起步较晚，500kV舟山大跨越工程采用了钢管混凝土跨越塔。

三、跨越塔动力特性分析

大跨越塔高度高，塔身风荷载是跨越塔主要的荷载。由于跨越塔属于高柔结构，在随机风荷载作用下的动力响应强烈，大跨越塔结构动力特性分析是跨越塔风振响应研究和结构抗风设计的基础，因此大跨越设计需开展跨越塔动力特性分析，研究跨越塔结构的自振频率、振型等特性。

大跨越动力特性分析一般采用有限元软件建立三维空间模型，通过子空间迭代法等方法进行模态分析，获得尽可能准确的结构动力特性。建立有限元模型应合理选择各类构件的梁、杆单元，尽可能模拟跨越塔的连接状态，同时应考虑节点、铁塔附件等引起的自重增加，导线、地线自重可模拟为集中荷载施加在导线、地线挂点。

跨越塔塔头布置形式的选择应考虑铁塔动力特性分析的结果，若铁塔第一振型为扭转振型或扭转振型与一阶弯曲振型频率接近，应考虑调整横担布置方式，采取减小横担长度，加大塔身宽度等方式提高铁塔整体抗扭刚度。

四、杆塔设计荷载

（一）杆塔上的荷载

作用在大跨越杆塔上的荷载按其性质可分为永久荷载、可变荷载和特殊荷载。

（1）永久荷载，包括杆塔自重力，导（地）线、绝缘子、金具的重力以及其他固定设备的重力。

（2）可变荷载，包括风荷载、导（地）线和绝缘子上的覆冰荷载，导（地）线和拉线的张力及施工检修时的临时荷载，结构变形引起的次生荷载以及各种振动动力荷载。

（3）特殊荷载，包括由于导（地）线断线所引起的荷载和由于地震引起的地震荷载，以及在山区或特殊地形地段，由于不均匀覆冰所引起的不平衡张力等荷载。

（二）风荷载计算

大跨越塔风荷载应根据不同电压等级的设计风速重现期按基准高度的基本风速进行计算，计算方法与一般线路风荷载基本相同，但需注意以下几点：

1. 杆塔风荷载调整系数

大跨越塔塔高一般均大于100m，杆塔风荷载调整系数应按GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》计算，但加权平均值对自立式塔不低于1.6。杆塔风荷载调整系数计算应采用铁塔动力特性分析后得到的自振频率和周期等成果。

2. 角度风荷载的分配

风向与导（地）线方向或塔面成夹角时，导（地）线风荷载在垂直和顺线条方向的风量，塔身和横担风荷载在塔面两垂直方向的分量按表12-12选用。

（三）不平衡张力计算

（1）悬垂型跨越杆塔的断线情况，应按−5℃、有冰、无风的气象条件，计算下列荷载组合：

1）对单回路杆塔，单导线断任意一相导线（分裂导线任意一相导线有纵向不平衡张力），地线未断；断任意一根地线，导线未断。

2）对双回路杆塔，同一档内，单导线断任意两相导线（分裂导线任意两相导线有纵向不平衡张力），地线未断；同一档内，断一根地线，单导线断任意一相导线（分裂导线任意一相导线有纵向不平衡张力）；同一档内，断两根地线，导线未断。

表 12-12　　　　角度风吹时风荷载分配表

风向角θ（°）	线条风荷载		塔身风荷载		水平横担风荷载		备注
	X	Y	X	Y	X	Y	
0	0	$0.25w_x$	0	w_{sb}	0	w_{sc}	
45	$0.5w_x$	$0.15w_x$	$\varphi\times0.424\times(w_{sa}+w_{sb})$	$\varphi\times0.424\times(w_{sa}+w_{sb})$	$\varphi\times0.35w_{sc}$	$\varphi\times0.7w_{sc}$	
60	$0.75w_x$	0	$\varphi\times(0.747w_{sa}+0.249w_{sb})$	$\varphi\times(0.431w_{sa}+0.144w_{sb})$	$\varphi\times0.45w_{sc}$	$\varphi\times0.55w_{sc}$	
90	w_x	0	w_{sa}	0	$0.50w_{sc}$	0	

注 1. X、Y 分别为垂直与顺导线、地线方向风荷载的分量。
2. w_x 为风垂直导线、地线方向吹时，导线、地线风荷载标准值。
3. w_{sa}、w_{sb} 分别为风垂直于 a 面及 b 面吹时，塔身风荷载标准值。
4. w_{sc} 为风垂直于横担正面吹时，横担风荷载标准值。
5. 塔身及横担风荷载系数 φ，对单肢构件取 1.0，对组合构件取 1.1。

3）对多回路杆塔，同一档内，单导线断任意三相导线（分裂导线任意三相导线有纵向不平衡张力）；同一档内，断一根地线，单导线断任意两相导线（分裂导线任意两相导线有纵向不平衡张力）；同一档内，断两根地线，单导线断任意一相导线（分裂导线任意一相导线有纵向不平衡张力）。

（2）耐张型杆塔的断线情况应按−5℃、有冰、无风的气象条件，计算下列荷载组合：

1）对单回路和双回路杆塔，同一档内，单导线断任意两相导线（分裂导线任意两相导线有纵向不平衡张力）、地线未断；同一档内，断任意一根地线，单导线断任意一相导线（分裂导线任意一相导线有纵向不平衡张力）；同一档内，断二根地线，导线未断。

2）对多回路塔，同一档内，单导线断任意三相导线（分裂导线任意三相导线有纵向不平衡张力）、地线未断；同一档内，断任意一根地线，单导线断任意两相导线（分裂导线任意两相导线有纵向不平衡张力）；同一档内，断任意两根地线，单导线断任意一相导线（分裂导线任意一相导线有纵向不平衡张力）。

（3）导线、地线断线张力（或分裂导线纵向不平衡张力）的取值应不低于表 12-13 规定的导线、地线最大使用张力的百分数，垂直冰荷载按 100%设计冰荷载。

（4）10mm 冰区不均匀覆冰的导、地线不平衡张力应按−5℃、有不均匀冰、10m/s 风速的气象条件和跨越段实际档距和高差计算，且不低于表 12-14 规定的数值。垂直荷载按不小于 75%设计冰荷载计算。

表 12-13　导线、地线断线张力（或分裂导线纵向不平衡张力）取值表　　%

断线张力（最大使用张力的百分数）			
地线	悬垂跨越塔导线（悬挂在固定线夹上）	耐张塔导线	
		单导线	双分裂及以上导线
100	60	100	70

表 12-14　不均匀覆冰情况的导、地线不平衡张力　　%

悬垂型杆塔		耐张型杆塔	
导线	地线	导线	地线
10	20	30	40

（5）重覆冰区跨越塔的不平衡张力应参照《重覆冰架空输电线路设计技术规程》规定的覆冰气象条件和跨越段实际档距、高差计算。导线、地线不平衡张力不应小于《重覆冰架空输电线路设计技术规程》规定的相应数值。垂直荷载按不小于 75%设计冰荷载计算。

（四）安装荷载

各类杆塔的安装情况，应按 10m/s 风速、无冰、相应气温的气象条件下考虑下列荷载组合。

1. 悬垂型杆塔的安装荷载

导线、地线垂直荷载可按 1.5 倍自重计算，提升绝缘子和金具等荷载可按 2.0 倍自重计算，导线、地线安装的附加荷载（包括安装工人和工具的重力）按表 12-15 选用。

表 12-15　导线、地线安装的附加荷载标准值　kN

电压等级（kV）	导线		地线		跳线
	跨越塔	耐张塔	跨越塔	耐张塔	耐张塔
110	2.5	2.5	1.5	1.5	1.0
220～330	5.0	6.0	3.0	3.0	2.0
500～750	7.0	8.5	3.5	4.0	3.0
±800、1000	12.0	16.0	6.0	6.0	8.0

2. 耐张型杆塔的安装荷载

耐张型杆塔的安装荷载应符合下列规定：

（1）导线及地线荷载。

耐张塔应考虑线路侧导线和地线尚未架设和已经架设两种受力状态。

（2）临时拉线所产生的荷载。

耐张塔均不考虑临时拉线水平力的平衡作用，但应计入临时拉线产生的垂直荷载。

（3）导地线牵引绳产生的荷载。

紧线牵引绳对地夹角一般按不大于 20° 考虑，计算紧线张力时应计及导、地线的初伸长、施工误差和过牵引的影响。

（4）安装时的附加荷载按表 12-15 的规定取值。

3. 大跨越杆塔荷载组合

大跨越杆塔荷载应考虑正常工况（大风、覆冰、低温）、事故工况、安装工况及验算工况（验算风速、验算覆冰、地震、导线舞动等），杆塔设计的荷载组合可参考表 12-16。

表 12-16　荷载组合的作用与方向

塔型	荷载情况		塔身风压				导线、地线荷载与塔的重力荷载										备注
			风向与 Y 轴夹角				X 方向				Y 方向				Z 方向		
			90°	60°	45°	0°	w_X	T_X	P_X	M_X	w_Y	T_Y	P_Y	M_Y	G_t	G_e	
直线塔	运行	大风	O				O	O				O			O	O	
直线塔	运行	大风		O			O	O			O	O			O	O	
直线塔	运行	大风			O		O	O			O	O			O	O	
直线塔	运行	大风				O		O			O	O			O	O	
直线塔	运行	覆冰	O				O	O		O		O			O	O	
直线塔	运行	不均匀覆冰	O				O	O		O		O			O	O	
直线塔	安装		O				O	O		O		O		O	O	O	X 垂直线路方向 Y 并行线路方向 Z 垂直地面方向
直线塔	断线							O		O		O	O	O	O	O	
直线塔	舞动		O				O	O				O			O	O	
直线塔	验算	大风	O				O	O				O			O	O	
直线塔	验算	大风		O			O	O			O	O			O	O	
直线塔	验算	大风			O		O	O			O	O			O	O	
直线塔	验算	大风				O		O			O	O			O	O	
直线塔	验算	覆冰	O				O	O		O		O			O	O	包括不均匀脱冰
直线塔	验算	地震	O				O	O				O			O	O	—
直线塔	验算	风振	O				O	O				O			O	O	适用于圆形断面构件的风激振动
耐张塔	运行	大风	O				O	O				O			O	O	—
耐张塔	运行	大风			O		O	O			O	O			O	O	—
耐张塔	运行	大风				O		O			O	O			O	O	—
耐张塔	运行	覆冰	O				O	O		O		O			O	O	—
耐张塔	运行	不均匀覆冰	O				O	O		O		O			O	O	—
耐张塔	运行	低温						O				O			O	O	—
耐张塔	安装		O			O		O		O		O		O	O	O	—
耐张塔	断线							O	O	O		O	O	O	O	O	—
耐张塔	舞动		O				O	O		O		O		O	O	O	—

续表

塔型	荷载情况		塔身风压				导线、地线荷载与塔的重力荷载										备注
			风向与 Y 轴夹角				X 方向				Y 方向				Z 方向		
			90°	60°	45°	0°	w_X	T_X	P_X	M_X	w_Y	T_Y	P_Y	M_Y	G_t	G_e	
耐张塔	验算	大风	O				O	O				O			O	O	—
					O		O	O			O	O			O	O	—
						O		O			O	O			O	O	—
		覆冰	O				O	O		O		O		O	O	O	包括不均匀脱冰
		地震	O				O	O				O			O	O	
		风振	O				O	O				O			O	O	适用于圆形断面构件的风激振动

注　1. w_X、w_Y——导线、地线和绝缘子风压在 X、Y 方向的分量。
　　2. T_X、T_Y——导线、地线张力和不平衡张力在 X、Y 方向的分量。
　　3. G_t——塔和设备质量。
　　4. P_X，P_Y——导线、地线断线张力在 X、Y 方向的分量。
　　5. M_X，M_Y——不对称张力或不对称垂直质量引起的扭矩或弯矩在 X、Y 方向的分量。
　　6. G_e——导线、地线和绝缘子等质量，以及安装时导线、地线张力的垂直分量。

五、铁塔常用节点形式

1. 相贯连接

相贯连接是钢管结构常用的节点型式，特别是在大跨越工程中，由于构件受力较大，横担与塔身连接处、交叉斜材交点处、塔身主斜材节点处等可选用相贯焊接节点。

采用相贯焊接的节点，应根据 GB 50017《钢结构设计规范》进行节点强度计算，必要时还可以进行节点有限元分析。

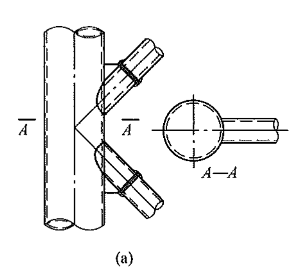
大跨越钢管塔结构中典型的的相贯连接节点见图 12-19。

2. 插板连接

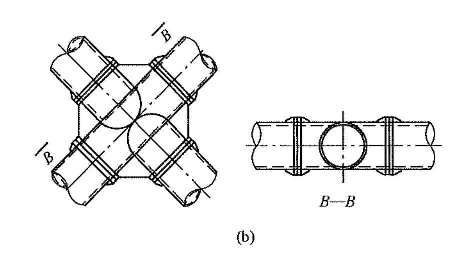
大跨越工程中，受力较小构件的连接可采用插板连接，插板连接在一般线路钢管塔中也具有较多地使用经验，较相贯连接而言减小了焊接加工工作量，加工质量较易保障。常用的插板形式有槽型插板、U 型插板及十字插板，一般用于主斜材节点及交叉斜材交点等，如图 12-20 所示。

3. 球节点连接

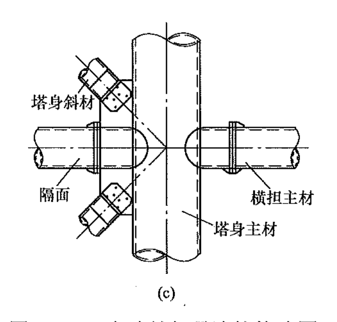
大跨越工程中连接支管较多且受力较大的节点可采用球节点，由于大跨越钢管构件直径较大，一般需采用超大直径薄壁焊接空心球节点，可通过非线性有限元分析方法进行专项设计和研究。跨越塔中可考虑球节点的位置一般有横担与塔身连接节点、塔身变坡处节点等，如图 12-21 所示为某大跨越工程中球节点应用案例示意图。



(a)



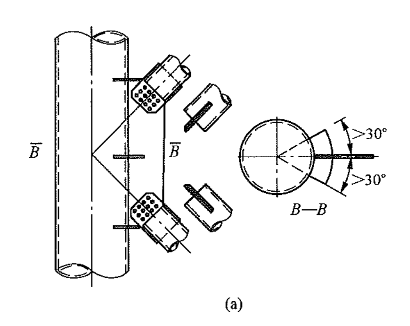
(b)



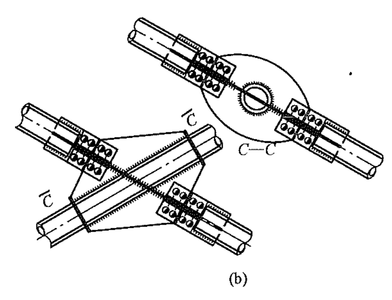
(c)

图 12-19　大跨越相贯连接构造图

（a）主斜材相贯焊接；（b）交叉斜材相贯焊接；（c）横担与塔身主材相贯焊接



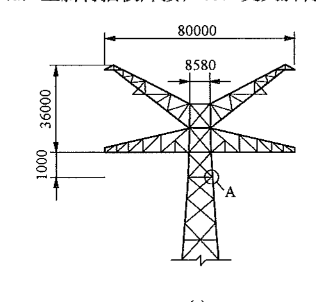
(a)



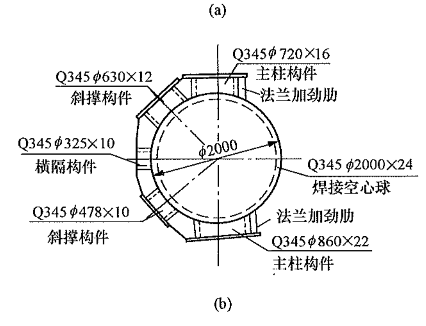
(b)

图 12-20 大跨越插板连接构造图

（a）主斜材插板焊接；（b）交叉斜材插板焊接



(a)



(b)

图 12-21 某大跨越球节点应用案例

（a）球节点应用位置；（b）A 处球节点示意图

六、基础型式选择

（一）基础选型原则

大跨越工程基础型式的选择应坚持保护环境和节约资源的原则，并根据跨越的地形、施工条件、岩土工程勘察数据，合理选择基础型式，避免破坏自然环境，满足安全、经济的要求。

（二）常用的基础型式

大跨越工程的基础型式主要包括钻孔灌注桩、混凝土预制桩、钢桩、人工挖孔桩等。当工程建设条件较好时，也可采用掏挖基础、岩石基础、板式基础等型式。

（三）基础型式选择的主要影响因素

大跨越线路一般可能是由跨越塔和锚塔组成的独立耐张段，除主跨段外尚包含漫滩段线路。鉴于大跨越线路的功能性要求，其基础工程的建设条件复杂，影响基础选型的因素较多。一般而言，影响基础选型的主要因素如下。

1. 基础承受荷载

大跨越工程的杆塔基础往往承受较大荷载。如某典型 500kV 大跨越工程，跨距 1340m、塔高 200m，其基础上拔力标准值达 7300kN、基础下压力标准值达 10500kN；而某跨越长江下游的 1000kV 工程，跨距 1793m、塔高 277.5m，其基础上拔力标准值可达 22000kN、基础下压力标准值可达 35000kN。对于如此量级的基础作用力而言，天然地基一般很难满足承载力要求。

2. 塔位地形地貌

大跨越线路的主跨段一般为耐–直–直–耐的单独耐张段，整个耐张段为一个系统性的有机整体，诸如跨越位置、跨越水域宽度、导地线机械强度、航空管制因素造成的塔高限制、航道通行要求和堤岸位置等因素均直接或间接地对跨越塔的具体位置产生影响，造成跨越塔的周边地形地貌往往呈现较大差异。根据目前国内建设的大跨越工程来看，跨越塔塔位的主要地形分为三类，即沿江（河）冲积平原（滩涂）、水域和岛屿丘陵。

（1）对于平原（滩涂）地形，由于地下水位较高，采用开挖基础施工难度极大，且基坑较大，施工质量不易保证，故宜采用桩基础。鉴于输电线路野外施工的特点，目前工程中通常采用钻孔灌注桩基础。但是，当塔位周边交通条件便利、岩土工程条件适合时，也可采用预制桩基础。

（2）对于水域地形，可采用钻孔灌注桩、钢管桩和沉井基础。

钻孔灌注桩是跨江及跨海工程中广泛采用的基础型式，设计与施工工艺成熟，适用于各种地层，且造价较低，对水利、航道和海事部门影响较小，但水平承载力略显不足。

钢管打入桩为水中基础的基本结构型式之一，管桩一般在工厂分节段制作，由打桩船插打，为此作业水深须满足打桩船作业的要求。由于可采用斜桩，故钢管桩可获得较好的水平承载力。该种桩型施工技术成熟，作业快捷，对水利、航道和海事部门影响较小，但造价较高。

沉井基础可在 4 个塔腿下单独设置，也可按整体

式进行设计，其整体性好、刚度大、稳定性好，对船撞和地震等水平力作用具有较高的承受能力。但是，沉井基础施工难度大，对环境要求较高，倾斜后纠偏不易，且对水利、航道和海事部门的影响也较大。

（3）对于岛屿丘陵地形，由于岩土工程条件一般较为理想且无地下水，故可采用原状土基础或人工挖孔桩基础。

3. 岩土工程条件

大跨越工程塔位通常位于江（河、海）边，下覆地基土多为淤泥、淤泥质粉质黏土、粉质黏土、粉砂、细砂，地下水位较高，工程地质条件一般不够理想。当工程地震设防烈度为 7 度及以上时，尚需考虑饱和粉砂、细砂地震液化的影响。因此，岩土工程条件成为制约基础选型的重要因素。

4. 工程水文条件

（1）设计水位。设计水位是跨越塔基础设计中需考虑的重要因素。

岸上立塔时：塔位宜设置在 5 年一遇洪水淹没区之外，并考虑堤岸冲刷变迁的影响。

水中立塔时：330kV 及以下线路，基础高度（立柱顶面）不应低于 30 年一遇洪水位；500kV 及 750kV 线路，基础高度（立柱顶面）不应低于 50 年一遇洪水位；特高压线路，基础高度（立柱顶面）不应低于 100 年一遇洪水位。

（2）冲刷影响。塔基冲刷包括一般冲刷和局部冲刷两类。一般冲刷是河床或塔基受水流（行洪）作用而普遍发生的冲蚀淘刷现象；局部冲刷指由于基础墩台和桩身的阻碍，水流在其周围产生强烈涡流而引起的冲刷。一般冲刷和局部冲刷共同作用，形成基础设计所需考虑的最大冲刷深度。

上述工程水文条件对大跨越工程的基础选型影响很大，往往是决定性的影响因素。

（3）冰的影响。对北方地区冬季结冰的河流，塔位宜设置在冬季冰面之外，同时还应进行防春季融冰时的冰排冲撞，设置合理的防撞措施。

（4）积淤的影响。对于有淤积的河流（如黄河），在设计基础顶面高度时，应预留出相应的淤积高度，避免长期运行淤积掩埋塔腿。

（四）基础选型及典型工程案例

大跨越工程的基础选型应结合基础承受荷载、塔位地形地貌、岩土工程条件和工程水文条件等因素，并经技术经济比较后综合确定。

通常情况下，综合考虑线路工程特点、上部结构作用荷载、地下水位、地基承载力、地震液化、设计洪水位和塔基冲刷等因素，钻孔灌注桩是大跨越工程的主要基础型式。交通便利、岩土工程条件适宜的塔位，可采用预制桩；当水中立塔且对水平承载力要求较高时，可采用钢管斜桩。当塔位地形为岛屿丘陵地形时，也可采用原状土基础或人工挖孔桩。

表 12-17 列举了多个典型大跨越工程的基础型式，以供读者参考。

表 12-17 典型大跨越工程基础型式

工程名	主跨距（m）	跨越塔塔高（m）	塔位地形	基本地震烈度	冲刷	运输条件	跨越塔基础型式
皖电东送淮南—上海 1000kV 长江大跨越	1793	277.5	滨江冲积平原	6	需考虑	不利	钻孔灌注桩
向家坝—上海±800kV 长江大跨越	2052	242	滨江冲积平原	6	需考虑	不利	钻孔灌注桩
锦屏—苏南±800kV 长江大跨越	1931	223	滨江冲积平原	6	需考虑	不利	钻孔灌注桩
杨东—斗山 500kV 江阴大跨越	2303	346.5	滨江冲积平原	6	需考虑	便利	PHC 预应力管桩
220kV 舟山—大陆联网工程大跨越	2756	370	岛屿丘陵	7	不考虑	不利	人工挖孔基础

七、基础设计荷载组合

大跨越工程基础的设计荷载组合，与一般线路相比更为复杂，通常需考虑多种永久荷载、可变荷载和特殊荷载，并以适合的方式予以组合。

（一）设计荷载

鉴于大跨越线路的功能性要求，其基础在设计时往往需要计及多种不同的永久荷载、可变荷载和特殊荷载。

（1）上部结构传来荷载。对于跨越塔而言，由于其高度较高，加之邻近水域环境而导致设计风速高于周围一般线路，故其占主导地位的可变荷载通常是风荷载。对于锚塔，其主要荷载则为导地线张力。

（2）流水压力。当大跨越工程在水中、漫滩或行洪区内立塔时，则须考虑流水压力的作用。流水对基础产生的压力按式（12-16）计算。

$$P_w = K \cdot A \times \frac{\gamma \cdot v^2}{2g} \tag{12-16}$$

式中 P_w——流水对基础的压力，作用在设计水位线以下1/3水深处，kN。

A——计算至一般冲刷处的基础阻水面积，m^2。

γ——水的重度，kN/m^3。

v——水流速度，m/s。

K——基础柱的形状系数。正方形断面，$K=1.5$；长方形断面（长边与水流平行）$K=1.3$；圆形断面，$K=0.8$；尖端形断面，$K=0.7$，圆端形断面，$K=0.6$。

g——重力加速度，$g=9.81m/s^2$。

（3）波浪力。跨越塔位于有波浪的水域中时，尚需考虑波浪力的作用。波浪力一般与河势、潮流、设计水位、波浪重现期、冲刷深度、风速与风向、设计波要素以及基础平面与立面布置等因素有关。

当存在波浪力影响时，通常应结合水流力综合考虑，称为波流力。波流力的计算较为复杂，具体可由有资质的水利研究单位开展研究并经综合评估确定。

基础设计时，除应计算波流力产生的水平作用外，尚应计算波浪对承台的浮托作用。

（4）地震作用。钢结构塔为空间桁架结构，较一般民用建筑而言具有高、轻、柔的特点，其自振周期一般也较大。因此，对位于地震烈度为9度及以上地区的钢结构跨越塔应计及地震作用的影响，而对位于地震烈度为7度及以上地区的混凝土跨越塔则均应进行抗震作验算。

（5）漂流物撞击作用。位于水中、漫滩或行洪区内的大跨越杆塔基础，设计时应考虑漂流物的撞击作用，其撞击作用标准值可按式（12-17）计算。

$$F = \frac{G \cdot v}{g \cdot t} \tag{12-17}$$

式中 F——漂流物作用在水位线上的冲撞力，kN；

G——漂流物的重力，kN；

v——水流速度（根据电压不同取30、50年或100年一遇流速），m/s；

t——撞击时间，如无数据，一般可取1s。

（6）船舶撞击作用。大跨越工程在通航水域立塔时，水中基础有受到失控船舶撞击的可能。目前，国内尚未见输电线路构筑物遭受船舶撞击的报道，但国内外桥梁（桥墩）遭受船舶撞击的案例却屡见不鲜。

国内目前尚没有针对输电线路工程船舶撞击力的研究方法和取值标准，设计时更多的是参照桥梁行业的相关标准和经验。

船舶撞击力设计时，可按以下步骤开展：

1）收集和掌握必要的工程建设基本条件，包括设计通航水位与净空高度、设计通航净宽、气象条件（气温、降水、雾、风况等）、水文条件（径流特征、潮位特性、潮汐特征等）、周围港口和航道环境（港口现状和规划、航道现状和规划、水上水下有关设施等）、水上交通环境（船舶交通流量、工程河段船舶航路、交通事故统计分析等）。

2）根据工程建设基本条件和其他支撑性文件，确定代表船型、水流速度和船舶航行速度、撞击速度和撞击角度。

3）根据船舶载重吨位、排水量和撞击速度，计算得到船舶撞击力。

船舶撞击力的设计计算较为复杂，不同标准和公式的设计要求和计算结果差异较大，具体可由有资质的水利及航运研究单位开展研究并经综合评估确定。

（二）荷载组合

大跨越工程跨越塔的基础设计荷载组合一般可考虑下列情况：

（1） 设计风荷载和相应的冲刷深度（宜取最大冲刷深度的50%～70%），荷载组合系数为1.0；

（2） 最大冲刷深度和50%设计风荷载，荷载组合系数为1.0；

（3） 最大冲刷深度和 50%设计风荷载并同时考虑漂流物及波流力的作用，所有荷载组合系数均取0.75；

（4） 最大冲刷深度、船撞力、最大通航风速对应的风荷载和波流力作用，所有荷载组合系数均取0.75。

对于特殊重要的大跨越线路，其荷载组合尚应根据上级职能主管部门的要求和各类荷载同时出现的可能性，经综合评估确定。

八、单桩极限承载力标准值的确定

大跨越线路由于其外荷载水平和特殊的岩土、水文工程条件，较多地以桩基作为首选基础形式。对于桩基设计而言，单桩极限承载力标准值是最重要的设计参数之一，往往对基础设计的安全性、合理性和经济性具有重大影响。而单桩极限承载力标准值的确定，不可避免地会涉及桩基设计等级问题。

（一）桩基设计等级

现行的JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》中，根据工程的重要性明确规定了建筑基桩的设计等级，分别为甲级、乙级和丙级，具体分类标准见表12-18。

DL/T 5219—2014《架空输电线路基础设计技术规程》未对输电线路工程桩基做出明确的等级划分原则，参照建筑行业JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》桩基分类原则，本手册亦将输电线路工程桩基的设计等级分为甲、乙、丙三级。

表 12-18 建 筑 桩 基 设 计 等 级

设计等级	建筑类型
甲级	（1）重要的建筑； （2）30 层以上或高度超过 100m 的高层建筑； （3）体型复杂且层数相差超过 10 层的高低层（含纯地下室）连体建筑； （4）20 层以上框架-核心筒结构及其他对差异沉降有特殊要求的建筑； （5）场地和地基条件复杂的 7 层以上的一般建筑及坡地、岸边建筑； （6）对相邻既有工程影响较大的建筑
乙级	除甲级、丙级以外的建筑
丙级	场地和地基条件简单、荷载分布均匀的 7 层及 7 层以下的一般建筑

现行的输电线路相关规程规范中，GB 50545—2010《110kV～750kV 架空输电线路设计规范》利用重要系数间接给出了杆塔安全等级划分，见表 12-19。按照杆塔与基础采用统一设计等级的原则，在确定单桩极限承载力标准值时，通常可按桩基设计等级为甲级执行。当工程有特殊要求时，也可采用其他安全等级进行设计。

表 12-19 杆 塔 安 全 等 级

安全等级	重要性系数	建筑类型
甲级	1.1	重要线路杆塔
乙级	1.0	除甲级、丙级以外的杆塔
丙级	0.9	临时线路杆塔

（二）单桩极限承载力标准值的确定方法

关于单桩极限承载力标准值的确定方法，目前各类现行规程规范的规定具体见表 12-20～表 12-22。

表 12-20 下压极限承载力标准值

作用方向	规程名称	甲级	乙级	丙级
下压极限承载力标准值	DL/T 5219—2014《架空输电线路基础设计技术规定》	有条件时应采用现场静载荷试验，并结合静力触探、标准贯入等原位测试方法综合确定。同一条件下不宜少于总桩数的 1%，且不应少于 3 根；当预计总桩数小于 50 根时，不应少于 2 根	应根据静力触探、标准贯入、经验参数等估算，并参照地质条件相同的试桩资料，综合确定。当缺乏可参照的试桩资料或地质条件复杂时，应由现场静载荷试验确定，测试数量同甲级桩基规定	如无原位测试资料时，可利用承载力经验参数估算
	GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》	应通过单桩静载试验确定。同一条件下不宜小于总桩数的 10%且不应少于 3 根		通过原位测试和经验参数确定
	JGJ 106—2014《建筑桩基检测技术规范》	应通过单桩静载试验确定。同一条件下不应少于 3 根，当预计总桩数小于 50 根时，不应少于 2 根	无相关试桩资料参考时，应通过单桩静载试验确定	—
	JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》	应通过单桩静载试验确定	当地质条件简单时，可参照地质条件相同的试桩资料，结合静力触探等原位测试和经验参数综合确定。其余应通过单桩静载试验确定	通过原位测试和经验参数确定

表 12-21 上拔极限承载力标准值

作用方向	规程名称	甲级	乙级	丙级
上拔极限承载力标准值	DL/T 5219—2014《架空输电线路基础设计技术规定》	有条件时单桩或基桩的上拔极限承载力标准值应通过现场单桩上拔静载荷试验确定		可按公式计算
	GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》	应通过单桩竖向抗拔载荷试验确定。同一条件下不宜小于总桩数的 1%且不应少于 3 根		
	JGJ 106—2014《建筑基桩检测技术规范》	应通过单桩静载试验确定	无相关试桩资料参考时，应通过单桩静载试验确定	未涉及
	JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》	应通过现场单桩抗拔静载试验确定		可按公式计算

表 12-22 水平承载力特征值

作用方向	规程名称	甲级	乙级	丙级
水平承载力特征值	GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》	应通过单桩水平载荷试验确定		
	JGJ 106—2014《建筑基桩检测技术规范》	单桩水平承载力特征值：应通过单桩静载试验确定。同一条件下不应少于 3 根，当预计总桩数小于 50 根时，不应少于 2 根	无相关试桩资料参考时，应通过单桩静载试验确定，测试数量同甲级桩基规定	未涉及
	JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》	承受水平力较大的桩基，应通过单桩静载试验确定		可按经验公式计算

由以上各表可以看出，就单桩极限承载力标准值（特征值）的确定方法而言，各规程的规定不尽相同。大体而言，建筑行业的规程规范要求相对较高；输电线路行业的规程，由于考虑到行业特殊性，其要求相对灵活。

目前工程实践中，考虑大跨越工程的重要性和特殊性，在确定下压极限承载力标准值、上拔极限承载力标准值和水平承载力特征值时一般均采用静载试验的方法。

结合输电线路工程特点，静载试验的试桩数量可按如下原则确定：

（1）根据前期勘察结果，当两岸岩土工程条件差异不大时，可选择相对不利一侧场地进行试桩。

（2）试桩总数不应少于 3 根；当预计总桩数小于 50 根时，不应少于 2 根。

九、沉降观测

大跨越工程通常基础负荷较大，且往往其岩土工程条件也不尽理想。大跨越线路构筑物的兴建，不但改变了地面原有的状态，并且对杆塔的地基也施加了较大的附加应力，这就必然会引起地基及周围地层的变形。因此，大跨越工程均要求开展沉降观测工作，其目的是：①为了保证杆塔和基础的安全性和正常使用寿命；②为以后的勘察、设计和施工提供可靠的资料及相应的沉降参数。

（一）沉降观测的必要性

根据 JGJ 8—2007《建筑变形测量规范》的要求，下列建筑物在施工及使用期间需进行沉降观测：

1）地基基础设计等级为甲级的建筑物；

2）复合地基或软弱地基上的设计等级为乙级的建筑物；

3）加层、扩建建筑物；

4）受邻近深基坑开挖施工影响或受地下水等环境因素变化影响的建筑物；

5）需要积累建筑经验或进行设计反分析的工程。

GB 50007—2010《建筑地基基础设计规范》中对基础设计等级的划分规定见表 12-23。

表 12-23 地基基础设计等级

设计等级	建筑和地基类型
甲级	重要的工业与民用建筑物。 30 层以上的高层建筑。 体型复杂，层数相差超过 10 层的高低层连成一体建筑物。 大面积的多层地下建筑物（如地下车库，商场，运动场等）。 对地基变形有特殊要求的建筑物、复杂地质条件下的坡上建筑物（包括高边坡）。 对原有工程影响较大的新建建筑物。 场地和地基条件复杂的一般建筑物。 位于复杂地质条件及软土地区的二层及二层以上地下室的基坑工程。 开挖深度大于 15m 的基坑工程。 周边环境条件复杂、环境保护要求高的基坑工程
乙级	除甲级、丙级以外的工业与民用建筑物。 除甲级、丙级以外的基坑工程
丙级	场地和地基条件简单，荷载分布均匀的七层及七层以下民用建筑及一般工业建筑物；次要的轻型建筑物。 非软土地区且场地地质条件简单、基坑周边环境条件简单、环境保护要求不高且开挖深度小于 5.0m 的基坑工程

目前工程实践中，考虑大跨越工程的重要性和特殊性，一般均须对跨越塔进行沉降观测。

（二）沉降控制要求

鉴于输电铁塔的功能性要求和结构特点，其对基础的均匀沉降并不敏感。但是，不同基础间的不均匀沉降和单个基础的倾斜，会对上部结构产生明显的附加应力，甚至导致杆塔结构破坏，因此对基础沉降须加以控制和监测。

单个基础的倾斜率允许值应按表 12-24 的规定采用。

表 12-24 基础倾斜率允许值

塔的总高度 H（m）	倾斜允许值 $\tan\theta$
$50<H\leqslant 100$	0.005
$100<H\leqslant 150$	0.004
$150<H\leqslant 200$	0.003
$200<H\leqslant 250$	0.002

续表

塔的总高度 H（m）	倾斜允许值 $\tan\theta$
$250<H\leqslant300$	0.0015
$300<H\leqslant400$	0.001

相邻基础间的沉降差限值应按表 12-25 的规定采用。

表 12-25 相邻基础间的沉降差限值

结构类型	地基土类别	
	中低压缩性土	高压缩性土
当基础不均匀沉降时会产生附加应力的结构	$\leqslant0.002L$	$\leqslant0.003L$

注 L 为相邻基础中心间的距离。

（三）沉降观测要点

1. 沉降观测施工图

沉降观测施工图应包含工程名称、沉降观测点及基准点平面布置图、沉降观测点及基准点详图、沉降观测施工图说明书等内容。

2. 水准点设置

沉降观测水准点（或称水准基点）在一般情况下，可以利用工程标高定位时使用的水准点作为沉降观测水准点。如水准点与观测点的距离过大，为保证观测的精度，应在塔基附近另行埋设水准点。

水准点应在横线路方向和顺线路方向各设置一处，埋设应坚固（不应埋设在道路、仓库、河岸、新填土、将建设或堆料的地方以及受震动影响的范围内），与塔位的间距一般为 30～50m。水准点标志应采用铜或不锈钢等耐腐蚀金属材料制成，立尺部位应突出、光滑、唯一，并安装保护罩以防撞击。

3. 沉降观测点设置

沉降观测点应在每个基础承台上均匀对称地设置四处。沉降观测点标志应采用铜或不锈钢等耐腐蚀金属材料制成，立尺部位应突出、光滑、唯一，并安装保护罩以防撞击。

4. 沉降观测时间和次数

每个承台施工完毕后应测量一次沉降，混凝土达到 28 天龄期时再测量一次，在铁塔施工前对所有承台测点进行一次全面的测量，此后每安装完一段塔身或横担均应测量一次，线路投运前测量一次。此后第一年每三个月测量一次，第二年每六个月测量一次，第三年开始每年测量一次，直至沉降稳定（连续两年半年沉降量小于 2mm）为止。

5. 沉降观测记录

每次沉降观测后，应及时计算各沉降观测点的高程、本次沉降量、累计沉降量和平均沉降量，并根据各个阶段观测成果绘制荷载—沉降—时间（Q—s—t）关系曲线和沉降—距离（s—L）关系的展开曲线图。沉降观测记录应妥善保存，并提供一份供设计单位留存。

第九节 附 属 设 施

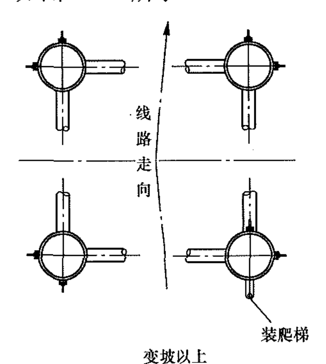
一、登塔设施

跨越塔通常较一般线路杆塔高许多，采用一般线路杆塔的登塔设施通常无法满足施工及运行维护的要求。因此，跨越塔须设置特殊的登塔设施，而与一般线路杆塔高度相当的锚塔则参照一般线路即可。

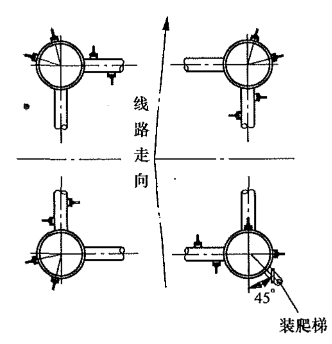
跨越塔的登塔设施一般可分为脚钉、爬梯、工作平台、走道和电动提升装置五类。

（一）脚钉

跨越塔的四根主材、钢管塔带有中间节点的水平材和斜材应安装脚钉。脚钉一般应采用防滑型，可由圆钢制成，直径不宜小于 16mm，间距为 400～450mm 交错布置，如图 12-22 所示。



变坡以上



变坡以下

图 12-22 脚钉布置

当钢管构件管径大于 400mm 时，脚钉水平方向弧长 θ 约等于 400mm；当管径不大于 400mm 时，脚钉在钢管两侧交错布置，如图 12-23 所示。

当跨越塔采用钢管结构时，其中一根主材上可设置脚钉管（见图 12-24），另三根设置脚钉。脚钉管就

是将脚钉安装于不同长度的主钢管上，在加工厂制造完成后，可单独运至现场与铁塔组装。其优点可以避免运输过程中脚钉的损坏，而且脚钉管结构是布置在一个平面上，较之单纯的脚钉更易于攀爬，降低了登塔的难度。

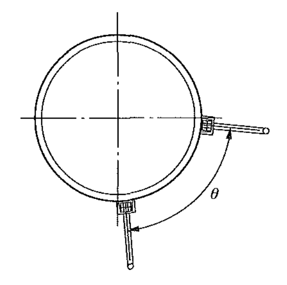


图 12-23　水平方向脚钉间距

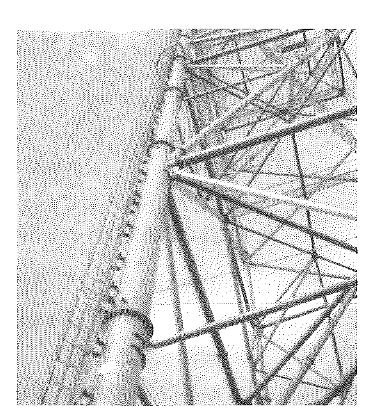

图 12-24　脚钉管

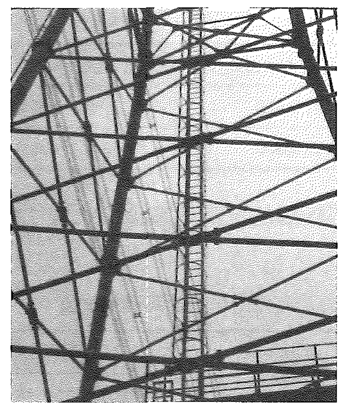
（二）爬梯

跨越塔爬梯分为直爬梯和旋梯两种。一般，当跨越塔高度较低时，可采用直爬梯；如果塔高较高时，需设置旋梯；当配有电动提升装置时，可设置旋转爬梯作为备用登塔设施。

1. 直爬梯

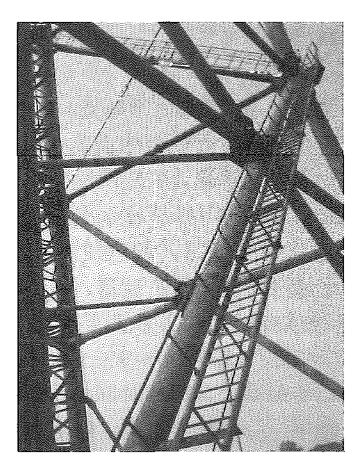
直爬梯的梯梁一般采用角钢或钢管，梯宽为450～500mm，踏步一般采用$\phi16$～$\phi20$ 圆钢，踏步间距宜为350～400mm，护圈直径不宜小于600mm。直爬梯可沿塔面设置，也可附着于主材上，如图 12-25 和图 12-26 所示。

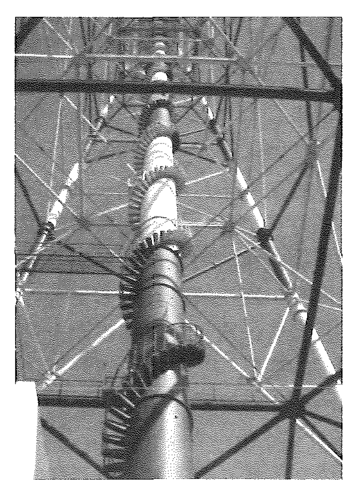

图 12-25　沿塔面直爬梯


图 12-26　沿主材直爬梯

2. 旋梯

旋梯可采用塔外旋梯、塔中井架旋梯、电梯井筒旋梯三种类型。塔外旋梯和塔中井架旋梯的梯宽不宜小于 550mm，两侧应设置高度不小于 1.2m 的栏杆；电梯井筒旋梯的梯宽不宜小于 600mm，并在外侧设置高度不小于 1.2m 的栏杆，如图 12-27、图 12-28 所示。


图 12-27　塔外旋梯

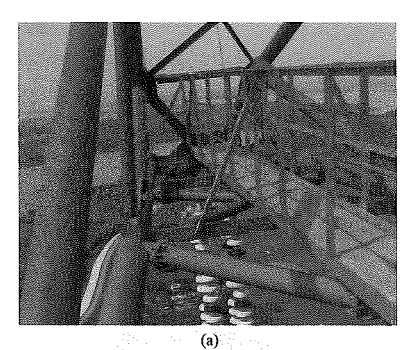

图 12-28　电梯井筒旋梯

旋梯梯梁与水平面的夹角一般在 45°～60° 之间。旋梯的踏步可采用格栅板或花纹钢板制作，垂直间距不宜大于 250mm。当梯的总长度超过 8m 时，应设置桁架托梁。

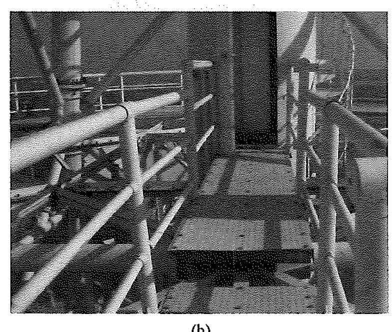
（三）工作平台和走道

跨越塔的顶架、横担一般应设置走道，其宽度不宜小于 600mm。在跨越塔的必要位置尚需设置工作平台。走道两侧与工作平台周围均需设置高度不小于 1.2m 的栏杆。走道、工作平台应与登塔设施相连接，并能到达各个挂线点和需要维护的设备位置。走道铺板可采用圆钢（直径不宜小于 16mm）、格栅板、花纹钢板制成，如图 12-29、图 12-30 所示。

走道和工作平台应能承受标准值为 $2.5kN/m^2$ 的均布荷载作用，护栏顶部应能承受标准值为 $1kN/m^2$ 的水平荷载作用。



(a)



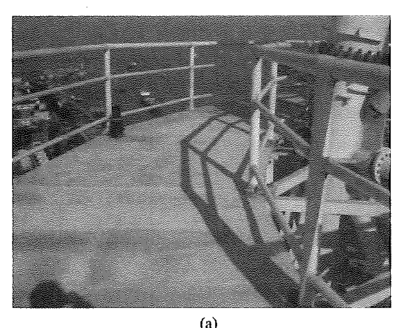
(b)

图 12-29 走道

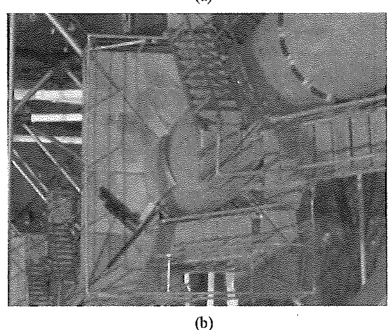
（四）电动提升装置

电动提升装置应结构简单、安全可靠、便于维修，所有设施接近地面的部分应具有防盗和关闭功能。

电动提升装置可分为电梯和爬塔机两种。早期大跨越工程多使用电梯作为电动提升装置，其优点是适应性强，制造及运行经验丰富，缺点是须使用接入式电源，造价较高。近年来，爬塔机的应用逐渐得到推广，其具有自带动力电源、吊笼及导轨可拆卸等优点，但乘员体感舒适度略差，塔高较高时的适用性尚待验证。



(a)



(b)

图 12-30 工作平台

1. 电梯

电梯按传动方式不同可分为曳引拖动式和齿条导轨式，不同传动方式的特点比较见表 12-26。按爬升方式不同可分为直爬式和斜爬式，按照轿厢位置不同可分为露天运行和封闭井筒两种形式，不同爬升方式的特点比较见表 12-27。其中，直爬式电梯多为曳引拖动，斜爬式电梯多为齿条导轨传动，井筒直爬式电梯如图 12-31 所示，外露斜爬式电梯如图 12-32 所示。

表 12-26 不同传动方式的特点比较

传动方式	齿条导轨式	曳引拖动式
特点	（1）电梯的提升靠齿轮和齿条导轨的啮合传动，对塔体结构的变形要求相对要低，但轿箱机械振动较大，舒适度较差。 （2）不需要通长的牵引绳，安全和可靠性较好。 （3）长期处于自然环境中，维护保养要求高。 （4）价格较低	（1）国内有规模的电梯厂家基本均能生产，挑选范围较广。 （2）电梯靠塔顶机房内的曳引机通过钢丝绳提升轿箱。但对塔体的变形要求较高。 （3）由于缆绳较长，需要经常调整。 （4）在井筒内运行，运行环境较好，易于保养，维修方便。 （5）电梯井筒将增加塔身风压，井筒自身也耗较多钢材

表 12-27　不同爬升方式的特点比较

项目	井筒（井架）直爬式电梯	外露斜爬式电梯
外形	整体较为美观	附着于塔身主材
舒适程度	由于封闭运行，人在电梯中的环境感觉较差	电梯外露运行，环境感觉较好
荷载	风荷载增加大，对本体重力有较大影响	整体挡风面积小
耗钢量	由于井筒、走道及平台，耗钢量增加较多	耗钢量低
加工	附属设施较为复杂，加工难度大，周期长	电梯连接件布置于塔身主材上，易于加工
施工	井筒焊接较多，容易变形，现场组装难度高	施工难度小
运行维护	运行维护方便，成本较低	抵抗恶劣天气能力差，运行维护成本较高
造价	工程造价高	工程造价低

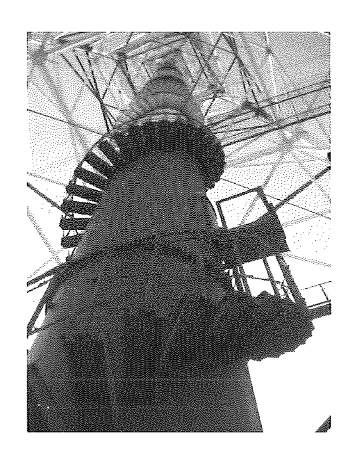
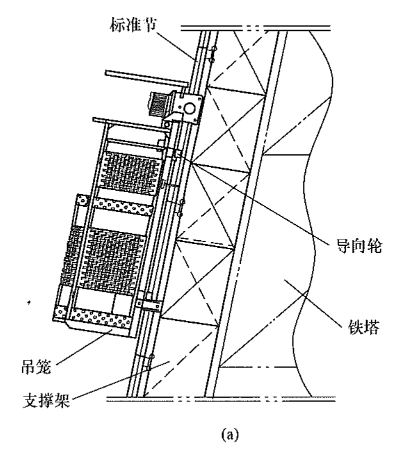

图 12-31　井筒直爬式电梯

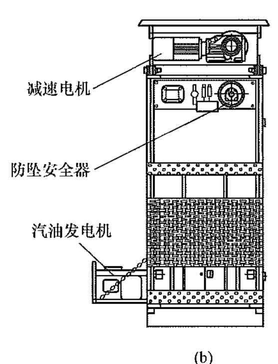

图 12-32　外露斜爬式电梯

2. 爬塔机

爬塔机主要有两种设置型式：一种为利用铺设于塔面上的导轨，通过齿轮齿条连接传动，将吊笼提升至塔顶，类似于外露斜爬式电梯，其结构如图 12-33 所示；另外一种为在塔中心专门设置攀爬机桁架井筒，导轨敷设在井筒上，垂直上下移动，其结构如图 12-34 所示。



(a)



(b)

图 12-33　爬塔机结构图（外露斜爬式）


图 12-34　爬塔机结构图（井筒直爬式）

3. 电动提升装置的选择

跨越塔的电动提升装置，应根据塔高、运行环境、设备维护、整体造价和业主要求综合评估确定，表 12-28 是国内具有代表性的大跨越工程电动提升装

置使用情况，供读者参考。

表 12-28 电动提升装置使用一览表

工程名称	跨越塔高度（m）	电动提升装置型式	轿厢位置
500kV 芜湖大跨越	229	曳动式电梯	井筒内
500kV 吴淞口大跨越	177.5	曳动式电梯	井筒内
500kV 江阴大跨越	346.5	齿条式电梯	井筒内
500kV 马鞍山大跨越	257	曳动式电梯	井筒内
500kV 广东崖门大跨越	215.5	齿条式电梯	井筒内
500kV 荻港大跨越	202	齿条式电梯	露天
500kV 镇江大跨越	179	齿条式电梯	露天
500kV 珠江大跨越	235	齿条式电梯	露天
±800kV 灵绍线长江大跨越	275	爬塔机	塔中心井筒
±800kV 向上线长江大跨越	242	爬塔机	塔面
±800kV 锦苏线长江大跨越	223	爬塔机	塔面
1000kV 淮上线长江大跨越	277.5	曳动式电梯	井筒内
1000kV 榆潍线黄河大跨越	204	爬塔机	塔中心井筒

二、防撞设施

大跨越工程在通航河流中或其他可能遭受水中漂流物冲撞的位置立塔时，应设立防冲撞保护设施。目前，防冲撞保护设施的主要种类如下。

1. 防撞桩

该防撞方式由群桩组成，群桩间用缓冲梁连接，其规模可大可小，从经济角度考虑，小能量碰撞时较为合理，如图 12-35 所示。

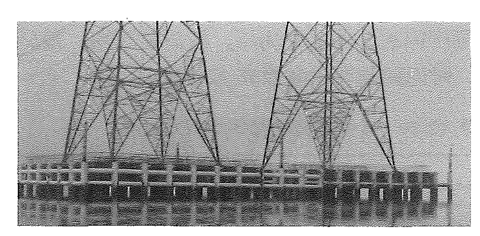
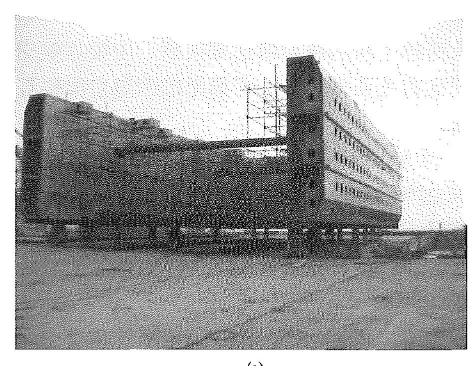


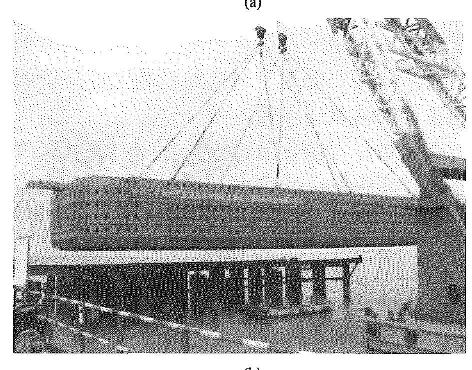
图 12-35 防撞桩

2. 防撞钢套箱

防撞钢套箱是桥梁基础中常用的防撞设施，它包括箱底、箱底上连接箱壁、箱壁由内箱壁和防撞外箱壁组成，防撞外箱壁上开设消波孔，内箱壁上连接用于固定定位的内挑梁，如图 12-36 所示。施工时该箱既是挡水围堰又是模板结构，施工完成后又是基础墩台的防撞保护结构。该防撞方式的特点为抗撞击性能强，但采用油漆防腐，其耐腐蚀性能较差，结构易锈蚀。



(a)



(b)

图 12-36 防撞钢套箱

3. 浮式全复合材料防撞

浮式全复合材料防撞分为圆管式、蜂窝式、箱体式三种防撞形式，该防撞其特点是抗撞性能强，耐腐蚀性能较好，造价较低，但复合材料本身较脆，耐候性不理想，如图 12-37 所示。

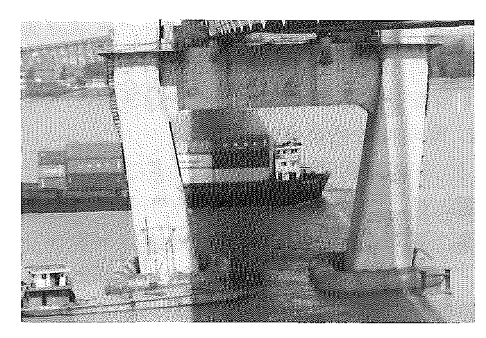


图 12-37 全复合材料防撞

4. 浮式钢质-复合材料防撞

此类防撞该防撞设施，其内部为钢质结构，外覆复合材料。该防撞的特点为抗撞性能强，耐腐蚀性能

好，但造价较高。

防冲撞保护设施的选择，应根据设计撞击能量、使用年限要求、功能性要求和工程造价等经综合技术经济比较后确定。

三、警航设施

大跨越工程的跨越塔通常很高，应根据航空和航道管理的有关要求，安装可靠耐用的航空障碍灯和警示标志。

（一）航空障碍标志的分类

航空障碍灯：设置在输电塔的塔身上，用于夜间/全天警示；

警航球：设置在输电线路的最高地线上，用于白天警示；

标志漆：环状色带刷涂在输电塔的塔身上，用于白天警示；

警航旗帜：用于不适合使用上述标志的输电线路的临时警示作用，如架空输电线路施工过程中的临时构造物及移动输电线路等。

若输电塔设有在昼间运行的B型高光强障碍灯，可不设置其他航空障碍标志。

（二）架空输电线路航空障碍标志设置原则

1. 基本要求

根据MH 5001—2013《民用机场飞行区技术标准》规定，架空输电线路的障碍标志是为飞行器白天/夜间提供目视助航的设施。

输电线路的障碍标志不仅要标志输电杆塔是障碍物，同时要反映输电地线的存在。杆塔和地线被称为复杂障碍物，其中地线对安全性影响更大。

障碍标志的设置要求是：最顶点、最边缘能够显示出障碍物的一般轮廓。并且在天气晴朗时，在航空器有可能接近它的所有方向上至少从空中1000m、从地面300m的距离上应能被识别出来。

标志物的形状应醒目，且其醒目的程度应保证其不致被误认为是用来传达其他信息的标志物，同时它们应不增加其所标志输电线路产生的影响。

2. 障碍物限制面内的要求

（1）在机场障碍物限制范围内超过起飞爬升面、进近面、过渡面、锥形面以及内水平面的现有架空输电线路，若经航行研究认为该输电线路不致危及飞行安全，并经民航行业主管部门批准，该输电线路应按规定设置障碍标志。

（2）下列各类输电线路应该设置航空障碍标志，若跑道供夜间使用，还应设灯光标示：

1）距离起飞爬升面内边3000m以内、突出于该面之上的固定障碍物；

2）邻近起飞爬升面的输电线路，虽然未构成障碍物，但航空部门认为有必要；

3）突出于距离进近面内边3000m以内或突出于过渡面之上的固定障碍物；

4）除非对已制定有程序用以确保与规定的航道保持安全的垂直净距；经航行研究表明该障碍物不影响航行，否则突出于内水平面之上的固定障碍物；

5）突出于其他障碍物保护面之上的输电线路；

6）经航行研究认为其会对航空器产生障碍时。

（3）下列情况中，满足任一条件时可不装设航空标志：

1）输电线路高度低于150m且装有在昼间运行的A型中光强障碍灯时；

2）已装有在昼间运行的高强度障碍灯时；

3）该障碍物已被另一固定障碍物所遮蔽时。

3. 障碍物限制面外，净空区范围内的要求

障碍物限制面以外的机场附近地区，距机场跑道中心线两侧各10km、跑道端外20km以内的区域内，高出地面标高30m且高出机场标高150m的输电线路应视为障碍物，除非经航行部门研究认为其并不危及飞行安全。

4. 其他影响航路的要求

对于横跨河流、山谷、公路、铁路等输电线路，当航空主管部门确认对航空器飞行构成影响时，应设航空障碍标志。

（三）大跨越线路航空障碍标志设置建议

1. 航空障碍灯

（1）采用B型中光强障碍灯时还应配合其他航空障碍标志。障碍灯应设置在至少三个高度层：杆塔顶部、导线的弧垂最低点、上述两层之间的大致中间高度（若导线的弧垂最低点的高度低于杆塔塔基，则设置在周围等高的地形或结构上）；三层障碍灯同时闪光；每层障碍灯的数量和布置应能在每一个方位角将导线杆塔标明出来。

（2）采用B型高光强障碍灯，应设置至少三层障碍灯，位置要求同中光强障碍灯。三层障碍灯按照特定的顺序闪光，先是中间层，然后是顶层，最后是底层灯，时间间隔要求参照表12-29。

表12-29 B型高光强障碍灯闪光间隔

闪光间隔	周期时间比
中层灯与顶层灯之间	1/13
顶层灯与底层灯之间	2/13
底层灯与中层灯之间	10/13

每层障碍灯的数量和布置应能在每一个方位角将导线杆塔标明出来。

（3）航空障碍灯的备用光源应具备自投入功能。

2. 警航球

警航球直径不应小于 60cm，当采用直径 60cm 的警航球时，其间距不应大于 30m。当警航球直径增大时，间隔可随之相应增大。安装在多条电线上的警航球，其间距要求应用于不同电线上的相邻警航球之间。单个警航球应是一种颜色：航空橙色、白色或红色。当采用多个白色及红色或白色及橙色警航球时，它们应相间设置。所选的颜色应与看到它时的背景形成反差。当使用少于四个警航球时，应使用航空橙色。在涉及多条电线等的场合，警航球应设置在输电线路的最高电线上。

3. 标志漆

采用橙色与白色或红色与白色相间的色带模式，环状色带刷涂在输电线路杆塔的塔身上。色带沿竖直方向分布，色带等宽且不超过 30m，杆塔顶端和底部色带的颜色应为较深颜色，即橙色或红色。

4. 警航旗帜

警航旗帜适用于临时性的航空障碍标示，应展示在输电线路的顶部或最高边缘的四周。

四、其他设施

1. 在线监测

大跨越工程安装在线监测系统，可将大跨越运行情况及时传送到监测中心，人员在监测中心远距离就可对输电线路实时监控，减少巡视工作，帮助检修人员对问题进行快速了解。输电线路在线监测系统已成为智能电网输电环节的重要组成部分，是实现输电线路状态运行、检修管理、提升生产运行管理精细化水平的重要技术手段。可根据大跨越工程的实际情况选择性安装视频/图像、微风振动、导线温度、导线载流量、导线弧垂、微气象等在线监测设备。

2. 供电电源

航空障碍灯应能够不间断运行，确保航空安全。另外，电动提升装置应可靠运行。因此应至少配有一套可靠电源和一套备用电源。为维护控制设备，可同时配套设立简易运行站。

第十三章



输电线路在建设和运行过程中会对自然环境产生影响。一般来说，输电线路对环境的影响，主要是施工对环境的影响、电磁环境影响及生态环境影响。具体体现在建设期间的短期影响和项目运行期的长期影响。建设期间的影响主要包括：输电线路的施工建设具有建设周期长、施工地点分散等特点，除塔基长期占用土地外，施工过程中线路和塔基还需要临时占用部分土地（如施工便道、施工堆料场、张牵场等），使部分植被遭到短期损坏；人员及车辆的进出、施工爆破等对当地居民及野生动物也将产生不良影响；杆塔基础施工时基面的开挖，破坏了原有地貌及植被，使其产生水土流失。这些影响属于有限和暂时的，随着施工的完成影响亦不复存在。输电线路在运行期的影响主要是指电气方面的影响，如电磁场、无线电干扰、可听噪声及线路在途经居民区、生态敏感区对人和动物的生活产生的影响等。低电压等级线路的影响有限，但超高压和特高压交直输电线路的电磁环境影响已成为线路设计和建设的制约因素。因此，必须在线路设计中充分重视，保护好环境。

第一节　电 磁 环 境 保 护

一、输电线路电磁环境参数限值及防护间距

（一）输电线路电磁环境参数限值

输电线路电磁环境参数限值应满足相关规范、规程的规定，交直流输电线路电磁环境参数的限值如下。

1. 交流线路

（1）工频电场强度限值。

居民区及线路跨越公路、铁路、水运等交通干线对电磁环境要求较高的地区，其线下附近地面的未畸变工频电场强度不应大于 7kV/m，非居民区不应大于 10kV/m。500kV 及以上电压等级交流输电线路跨越非长期住人的建筑物或邻近民房时，房屋所在位置离地面 1.5m 处的未畸变电场不得超过 4kV/m。

（2）工频磁感应强度限值。

线路附近工频磁感应强度不应大于 100μT。

（3）无线电干扰限值。

110～1000kV 架空输电线路的无线电干扰限值：在距离边相导线地面投影外 20m、对地 2m 高度处，频率为 0.5MHz 时无线电干扰值应符合表 13-1 的规定。

表 13-1　无 线 电 干 扰 限 值

标称电压（kV）	110	220～330	500	750	1000
海拔（m）	≤1000				≤500
限值 dB（μV/m）	46	53	55	58	58

（4）可听噪声限值。

110～1000kV 架空输电线路距线路边相导线投影外 20m 处，湿导线条件下的可听噪声限值应符合表 13-2 的规定。

表 13-2　可 听 噪 声 限 值

标称电压（kV）	110～750	1000
海拔（m）	≤1000	≤500
限值 dB（A）	55	55

2. 直流线路

（1）地面合成电场和离子流密度限值。

直流线路下地面合成电场强度和离子流密度限值不应超过表 13-3 的规定。

±400kV 及以上电压等级直流输电线路跨越非长期住人的建筑物或邻近民房时，在湿导线情况下房屋所在地面的未畸变合成电场不得超过 15kV/m。

（2）地面磁感应强度限值。

直流架空输电线路电流产生的地面磁感应强度应不超过 10mT。

表 13-3 地面合成电场强度和离子流密度限值

区域	合成电场强度（kV/m）		离子流密度（nA/m²）	
	晴天	雨天	晴天	雨天
居民区	25	30	80	100
一般非居民区（如跨越农田）	30	36	100	150
人烟稀少的非农业耕作区	35	42	150	180

（3）无线电干扰限值。

海拔 1000m 以下地区，距直流架空输电线路正极性导线对地投影外 20m 处，80%时间、80%置信度、频率 0.5MHz 时的无线电干扰限值不超过 58dB（μV/m）；对于海拔超过 1000m 的线路，其无线电干扰限值应进行高海拔修正。

（4）可听噪声限值。

晴天时，海拔 1000m 及以下地区，距直流架空输电线路正极性导线对地投影外 20m 处由电晕产生的可听噪声（L_{50}）不超过 45dB（A）；海拔大于 1000m 且线路经过人烟稀少地区时，控制在 50dB（A）以下。

（二）输电线路对无线台站的防护间距

1. 各类无线电台的等级划定

（1）GB 7495—1987《架空电力线路与调幅广播收音台的防护间距》规定，调幅广播收音台按行政隶属和业务性质分为如下三级：

一级调幅广播收音台：为广播电影电视部设在北京以外的转播发射台收转中央人民广播电台或中国国际广播电台节目的调幅广播收音台以及为省、自治区、直辖市直属转播发射台收转中央人民广播电台节目的调幅广播收音台。

二级调幅广播收音台：为省、自治区、地区、省辖市直属转播发射台收转省、自治区人民广播电台节目的调幅广播收音台；为地区、省辖市直属转播发射台收转中央人民广播电台节目的调幅广播收音台。

三级调幅广播收音台：为市、县级转播发射台收转中央人民广播电台和省、自治区人民广播电台节目的调幅广播收音台，以及县级有线广播网的调幅广播收音台。

（2）GB 7495—1987《架空电力线路与调幅广播收音台的防护间距》规定，调幅广播监测台按监测范围、监测项目、监测精度、工作时间以及技术设备的不同要求分为如下三级：

一级调幅广播监测台：广播电影电视部所属监测、监听国内外广播质量、技术参数、广播频谱负荷和测定广播电台方位，并进行有关电波传播研究等工作的监测台。

二级调幅广播监测台（站）：广播电影电视部、省、自治区、直辖市所属监测、监听部分广播质量、技术参数和测定广播电台方位等工作的监测台（站）。

三级调幅广播监测台（站）：为省、自治区、直辖市、地区、省辖市监测、监听区域性广播质量、技术参数等工作的监测台（站）。

（3）GB 13614—2012《短波无线电收信台（站）及测向台（站）电磁环境要求》规定，短波无线电收信台根据其行政隶属、业务性质、通信距离和设备功能分为如下三级：

一级台：中央、国务院直属各部、委、局及中国人民解放军军级以上（不含军）单位通信、监听和监测业务部门的收信台；对国防、公安和国家安全及海事安全关系重大，且具有大型建筑设施或地下工事与坑道，并具有大规模的天线场地、大型高增益天线的收信台；通信对象为亚洲以外国家、地区或远洋船队的收信台。虽符合以上条件，但台址设在城市收信区与发信区之间的收信台，按二级台保护。

二级台：各省、自治区、直辖市直属的收信台，中国人民解放军军级单位直属的收信台；对亚洲各国及其海域通信的收信台；航空通信和配属于雷达站、航海导航台的短波无线电收信台。符合以上条件，但收信工作方式仅为等幅报，按三级台保护。

三级台：中央、国务院各部委所属局、省属各市以及中国人民解放军师级单位设置的收信台，此类台应有正规架设的天线、正规建设的机房并担负比较重要的通信任务。

2. 交流线路

（1）DL/T 5040—2017《交流架空输电线路对无线电台影响防护设计规范》把交流输电线路对无线电台的影响分为有源干扰、无源干扰两个方面。有源干扰指由交流线路导线表面电晕放电等现象引起的无线电干扰。无源干扰由位于无线电台附近的交流线路金属体再次辐射电磁波引起的无线电干扰。交流输电线路对无线台站的防护间距（有源干扰）见表 13-4 的规定，供工程设计参考使用。

表 13-4　　交流输电线路与无线台站的防护间距　　m

无线电台站名称		交流输电线路电压等级（kV）			
		110	220、330	500	750、1000
短波无线电收信台	一级	1000	1600	2000	2600
	二级	600	800	1100	1600
	三级	500	600	700	1000
短波无线电测向台		1000	1600	2000	2600
调幅广播收音台	一级	800	1000	1200	1800
	二级	500	700	900	1000
	三级	300	400	500	700
调幅广播监测台	一级	1400	1600	2000	2400
	二级	600	800	1000	1250
	三级	300	400	500	750
电视差转台、转播台	VHF（Ⅰ）	300	400	500	750
	VHF（Ⅲ）	150	250	350	450（550）
VHF/UHF 航空无线电通信台		200	250	300	300
对空情报雷达站	（80～300）MHz	1000	1200	1600	1600
	（300～3000）MHz	700	800	1000	1000
航空无线电导航台	无方向信标台	500			
	超短波定向台	700			
	常规、多普勒全向信标台	500			
	常规测距仪台	500			
空管雷达站		450			
对海远程无线电导航台和监测站	发射天线	500			
	接收天线	—			

注　1. 表中括号内防护间距值用于 1000kV 交流线路。

2. 表中防护间距主要从交流线路对无线电台有源干扰方面考虑；对短波无线电测向台还应验算无源干扰防护间距，交流线路对短波无线电测向台的防护间距应取有源干扰影响防护间距和无源干扰影响防护间距两者中的大者。

3. 对雷达站，全向信标台应考虑遮蔽角影响。

4. 独立的调频电视差转台、转播台应按照 VHF（Ⅲ）频段电视差转台、转播台的防护间距加以保护。

5. 当交流线路与无线电台之间的距离不符合本表提供的防护间距时，可根据交流线路和无线电台的具体情况，通过计算或实测来评估交流线路对无线电台的干扰影响。

6. 当评估结果认为交流线路对无线电台存在干扰影响时，应采取必要的防护措施，并协商解决。

（2）当交流线路杆塔按相同塔高和档距直线排列时，单条交流线路对短波无线电测向台无源干扰影响的防护间距 D_P 可按下式计算。

$$D_P = k_1 k_2 h \tag{13-1}$$

式中　k_1——单基杆塔对短波无线电测向台无源干扰影响防护间距系数（无量纲），当杆塔高度 $h \leqslant 50$ 时可取为 60，当杆塔高度 $50 < h \leqslant 150$ 时可取为 20；

k_2——相对于单基杆塔，排列成行杆塔对短波无线电测向台无源干扰影响防护间距增大系数（无量纲），该系数与平均档距和杆塔高度的比值有关，可按表 13-5 取值；

h——交流线路杆塔高度，m。

表 13-5　　排列成行杆塔防护间距增大系数

序号	平均档距/杆塔高度	防护间距增大系数
1	5～10	2.3～1.8
2	10～15	1.8～1.4
3	15～20	1.4～1.1
4	>20	1

当交流线路路径为任意走向、杆塔高度和档距为任意值或有多条输电线路同走廊走线时，所有杆塔对短波无线电测向台产生的总测向误差应不大于 1°。总测向误差可根据各基杆塔高度、杆塔与短波无线电测向台天线间的距离等参数按以下要求进行计算。

1）当输电线路路径为任意走向、杆塔高度和档距为任意值或有多条输电流线路同走廊走线时，所有杆塔对短波无线电测向台产生的总测向误差可按下式计算。

$$\theta_{max} = \sqrt{\sum_{m=1}^{n}\sum_{i=1}^{j}\theta_{mi}^2} \tag{13-2}$$

式中　θ_{max}——所有杆塔产生的总测向误差（°）；

θ_{mi}——第 m 条输电线路的第 i 基杆塔产生的最大测向误差（°）；

n——同走廊输电线路数量；

j——某条输电线路影响短波无线电测向的杆塔基数。

2）当杆塔高度 $h_{mi} \leqslant 50$ 时，考虑杆塔再次辐射波传播时的倍程衰减后，单基杆塔产生的最大测向误差可按下式计算。

$$\theta_{mi} = \frac{180}{\pi} \times \frac{h_{mi}}{2d_{mi}} \tag{13-3}$$

式中 h_{mi}——第 m 条输电线路的第 i 基杆塔高度，m；

d_{mi}——第 m 条输电线路的第 i 基杆塔与短波无线电测向台天线间的距离，m。

3）当杆塔高度 $50<h_{mi}\leqslant 150$ 时，考虑杆塔再次辐射波传播时的倍程衰减后，单基杆塔产生的最大测向误差可按下式计算。

$$\theta_{mi}=0.241\times\frac{180}{\pi}\times\frac{h_{mi}}{2d_{mi}} \tag{13-4}$$

4）当杆塔产生的测向误差小于距短波无线电测向台最近一基杆塔产生的测向误差的五分之一时，可不考虑该基杆塔的影响。

3. 直流线路

（1）DL/T 5536—2017《直流架空输电线路对无线电台影响防护设计规范》把直流输电线路对无线电台站的影响分为有源干扰、无源干扰两个方面。有源干扰指由直流线路导线表面电晕放电等现象引起的无线电干扰。无源干扰由位于无线电台附近的直流线路金属体再次辐射电磁波引起的无线电干扰。直流输电线路对无线台站的防护间距（有源干扰）见表 13-6 的规定，供工程设计参考使用。

表 13-6 直流输电线路对无线台站的防护间距 m

无线电台站名称		直流输电线路电压等级（kV）	
		±400、±500	±660、±800
短波无线电收信台	一级	1600	2000
	二级	800	1100
	三级	600	700
短波无线电测向台		1600	2000
调幅广播收音台	一级	1000	1200
	二级	700	900
	三级	400	500
调幅广播监测台	一级	1600	2000
	二级	800	1000
	三级	400	500
电视差转台、转播台	VHF（Ⅰ）	400	500
	VHF（Ⅲ）	250	350
VHF/UHF 航空无线电通信台		250	300
对空情报雷达站	（80～300）MHz	1200	1600
	（300～3000）MHz	800	1000
航空无线电导航台	无方向信标台	500	
	超短波定向台	700	
	常规、多普勒全向信标台	500	
	常规测距仪台	500	
空管雷达站		450	
对海长波远程无线电导航台发射天线		500	

注 1. 表中防护间距主要从直流线路对无线电台有源干扰方面考虑；对短波无线电测向台，还应验算无源干扰防护间距。
2. 雷达站，全向信标台应考虑遮蔽角影响。
3. 调频电视差转台、转播台应按照 VHF（Ⅲ）频段电视差转台、转播台的防护间距加以保护。
4. 当直流线路与无线电台之间的距离不符合本表规定的防护间距时，可根据直流线路和无线电台的具体情况，通过计算或实测来评估直流线路对无线电台的干扰影响。
5. 当评估结果认为直流线路对无线电台存在干扰影响时，应采取必要的防护措施，并协商解决。

（2）直流线路对短波无线电测向台无源干扰防护间距计算方法用交流线路。

二、电磁环境采用的防护措施

1. 电磁环境防护措施的总体原则

对超高压以上的输电线路应综合分析、比较导线结构、相序、塔型、导线对地距离等对导线表面电场强度、地面场强、无线电干扰和可听噪声的影响，合理确定线路的设计参数，最终确定符合电磁环境限值要求的最佳的组合。

2. 控制地面场强措施

输电线路下空间场强的大小，除与电压等级有关外，还与导线的布置形式、几何位置及其尺寸等因素有关，可以通过以下方法减小交、直流特高压输电线下空间场强。

（1）调整导线离地高度、相（极）间距离、分裂导线结构尺寸、相（极）导线的布置方式等来降低线路下的电场强度。在这几种方式中，增加导线对地高度最为有效。靠减小相（极）间距离来减小地面场强，将受到绝缘配合和电晕损失的限制，而且直流线路极间距离对地面合成场强和离子流密度的影响更小；增

加分裂导线数目虽能减小线下地面场强，但影响很小。

（2）在条件允许或必要的情况下，对交、直流特高压输电线路可采取局部屏蔽措施，以达到减小线下一定范围内空间电场强度的目的。

（3）交流双回输电线路导线采用逆相序排列可有效减少地面场强。

3. 控制工频磁感应强度措施

交、直流输电线路的工频磁感应强度较小，远小于限值要求，因此，对工频磁感应强度在设计中不必采取控制措施。

4. 控制无线电干扰措施

适当增加导线的分裂根数和子导线直径、增加相（极）间距，选择合理的子导线分裂间距可降低输电线路的无线电干扰水平。但当分裂根数为 8 时，再增加子导线直径对降低无线电干扰水平已不太明显。

5. 控制可听噪声措施

（1）设计中采用对称分布增加导线分裂数目和加大分裂导线直径，可有效降低导线表面场强，从而达到降低可听噪声的目的。为降低工程的投资，在通过高海拔地区或珍稀动物自然保护区采用扩径导线，也可达到降低可听噪声的目的。

（2）输电线路的金具容易出现电晕放电而产生噪声，因此，设计中优化金具结构和加工工艺、选取防晕性能好的产品、研制新型防晕金具以达到降低可听噪声的目的，在降噪的同时又可实现节能目标，具有重大的社会意义和经济效益。

三、无线电台站的防护措施

1. 交、直流线路方面

输电线路可采取以下措施降低对无线电台的干扰：

（1）调整交流线路路径，与无线电台间保持合理距离，尽量利用接近段地形地物的屏蔽作用，从无线电台天线的非主接收方向通过。

（2）通过优化导线截面、子导线根数及导线布置方式，降低导线表面电场强度。

（3）选用防晕性能好的绝缘子和金具。

（4）导线采用张力放线等新工艺，保护导线不受磨损。

（5）加强交流线路与无线电台接近段的运行维护工作，防止间隔棒与导线铰结部位松动，及时清洁污秽绝缘子。

（6）与短波无线电测向台接近段，应合理选择铁塔高度和档距，地线宜采用分段绝缘、单点接地方式；同走廊内有多条输电线路时，铁塔宜以短波无线电测向台接收天线为中心的同一直径方向排列；采用非金属杆塔。

2. 无线电台方面

无线电台方面可采取下列措施增强抗干扰能力：

（1）改进接收天线性能，采用方向性强、增益高的天线型式。

（2）加大发射功率，提高接收信噪比。

（3）采用抗干扰能力强的信号波形和传送方式。

（4）采用抗干扰能力强的新型设备或部分设备更新，对短波无线电测向台采用空间谱估计测向设备等。

（5）通过软件升级以提高对目标信号的识别能力和对干扰信号的抗扰能力。

（6）移动天线位置或改造天线，对短波无线电测向台可将小基础天线改造为大基础天线。

（7）搬迁无线电台。

第二节　生态环境保护

输电线路的路径走向不可避免地要经过居民区、集中林区、草场、各类保护区等生态敏感区。输电线路的建设和运行对这些生态敏感区域必须做好保护，设计中应采取必要的措施，确保环境的可持续发展。线路建设对生态环境的保护要做到以下几点。

（1）设计应符合国家有关环保法律、法规、政策要求，线路路径方案选择时应充分听取地方政府、规划、国土资源、环保、林业、水利等部门的意见，尽量避开自然保护区、森林公园、风景名胜区、水源保护区、地质公园、居民区、城镇规划区、基本农田保护区、文物保护单位等重点生态保护目标，穿（跨）越生态敏感区应及时取得相应级别行政主管部门的同意文件，优化线路设计，尽量减少工程建设对环境的影响。

（2）线路路径方案选择时应尽量远离居民区、军事设施、机场、火车站、码头等设施；对于集中林区、宜林地、果园、经济作物区，采取尽量避开的原则；对于协议允许通过的集中林区、宜林地、果园、经济作物区，按树木自然生长高度跨越设计，减少树木砍伐和对生态的影响，保护生态环境。在初设、施工图设计阶段，应进一步优化线路路径及塔位，选择植被稀疏处及生态价值较低的土地立塔，最大限度减轻植被破坏，降低生态影响。优化塔型及基础设计，设计并选用少占耕地的塔型，减少线路走廊宽度，减少对耕地的占用。

（3）输电线路选线时，尽量避开民房，减少拆迁民房的数量。输电线路跨越建筑物或邻近房屋应满足输电线路设计规范有关强制性条款的要求。

（4）输电线路在跨越河流时，尽量不在主河道中立塔，避免线路对航运和河道泄洪能力的影响，并按相应的最高通航水位及最大空载船舶高度设计，留有

足够的安全净空，以利航运安全。

（5）输电线路与公路、铁路、通信线、电力线等交叉跨越时，严格按照不影响其安全距离的要求留有足够净空距离。

（6）输电线路经过草场时，应适当提高导线对地距离，减小对人和牲畜的影响。避免采用大开挖基础，减少施工期间的植被破坏。

（7）对当地群众进行有关高压输电线路和设备方面的环境宣传工作，帮助群众建立环境保护意识和自我安全防护意识。解释和宣传可避免矛盾的激化，减少环境纠纷。

（8）在山丘区段采用全方位高低腿铁塔、改良型基础，尽量少占土地、减少土石方开挖量和水土流失，保护生态环境。要求施工单位在施工时严禁随意倾倒、丢弃开挖出的土石方，应在塔基处就地平衡；塔位有坡度时应修筑护坡、排水沟等；施工结束应及时恢复植被，避免水土流失。

（9）在输电线路途径的危险位置建立各种警告、防护标识，避免人身和设备意外事故。

（10）有关（生态）敏感区的法律、法规。

1）《建设项目环境影响评价分类管理名录》（自2015年6月1日起施行）定义了环境敏感区，是指依法设立的各级各类自然、文化保护地，以及对建设项目的某类污染因子或者生态影响因子特别敏感的区域，主要包括：

a）自然保护区、风景名胜区、世界文化和自然遗产地、饮用水水源保护区。

b）基本农田保护区、基本草原、森林公园、地质公园、重要湿地、天然林、珍稀濒危野生动植物天然集中分布区、重要水生生物的自然产卵场及索饵场、越冬场和洄游通道、天然渔场、资源性缺水地区、水土流失重点防治区、沙化土地封禁保护区、封闭及半封闭海域、富营养化水域。

c）以居住、医疗卫生、文化教育、科研、行政办公等为主要功能的区域，文物保护单位，具有特殊历史、文化、科学、民族意义的保护地。

2）HJ19—2011《环境影响评价技术导则 生态影响》的规定如下：

a）特殊生态敏感区：自然保护区、世界文化和自然遗产地。

b）重要生态敏感区：风景名胜区、森林公园、地质公园、重要湿地、原始天然林、珍稀濒危野生动植物天然集中分布区、重要水生生物的自然产卵场及索饵场、越冬场和洄游通道、天然渔场等。

c）一般区域：除特殊生态敏感区和重要生态敏感区以外的其他区域。

3）自然保护区按类型分为自然生态系统类（森林生态系统类型、草原与草甸生态系统类型、荒漠生态系统类型、内陆湿地和水域生态系统类型、海洋和海岸生态系统类型）和野生生物类（野生动物类型、野生植物类型）及自然遗迹类（地质遗迹类型、古生物遗迹类型）。环保、林业、农业、地质矿产、水利、海洋等有关行政主管部门在各自的职责范围内，主管各类型的自然保护区。

自然保护区按等级分为国家级、地方级（省级、市级、县级）。国家级自然保护区，由其所在地的省（自治区、直辖市）人民政府有关自然保护区行政主管部门或者国务院有关自然保护区行政主管部门管理；地方级自然保护区，由其所在地的县级以上地方人民政府有关自然保护区行政主管部门管理；在自然保护区外围保护地带建设但对自然保护区的环境质量和生态功能有影响的项目，在批复其环境影响报告书前须经该自然保护区相应级别的环境保护行政主管部门批准。

自然保护区可以分为核心区、缓冲区和实验区。自然保护区内划为核心区的范围禁止任何单位和个人进入；核心区外围的缓冲区，只准进入从事科学研究观测活动；缓冲区外围的实验区，可以进入从事科学试验、教学实习、参观考察、旅游以及驯化、繁殖珍稀、濒危野生动植物等活动。自然保护区的内部未分区的，依照有关核心区和缓冲区的规定管理。

对输电线路而言，有功能分区的自然保护区，核心区和缓冲区为输电线路禁止进入区域，实验区为限制进入区域，须到其主管部门办理线路允许通过的协议。特殊注意的是有些县级自然保护区仅有范围和面积，未进行功能分区，其自然保护区按核心区和缓冲区的规定管理，一般输电线路是要避让的，如无法避让，需取得其管理部门同意线路通过的协议。

4）风景名胜区按等级分为国家级、省级和市级、县级。风景名胜区保护要求为：禁止在核心景区内建设与风景名胜资源保护无关的输电线路，在核心景区外的其他景区建设输电线路需办理审批手续。涉及国家级风景名胜区的输电线路建设项目由建设部批准。涉及省级风景名胜区的输电线路建设项目由省建设厅批准。涉及市（县）级风景名胜区的输电线路建设项目由市（县）建设行政主管部门批准。

5）森林公园按等级分为国家级、省级和市级、县级。森林公园保护要求为，在珍贵景物、重要景点和核心景区禁止建设输电线路工程，森林公园其他区域建设输电线路办理相关审批手续。依据《国家级森林公园管理办法》（国家林业局令2011年第27号），输电线路建设项目涉及国家级森林公园，需修改森林公园的总体规划，由省级林业主管部门组织专家评审并审核后，报林业部批准；输电线路建设项目涉及省级森林公园、市（县）级森林公园，依据《森林公园管

理办法》（中华人民共和国林业部令 第 3 号）第三条规定“林业部主管全国森林公园工作，县级以上地方人民政府林业主管部门主管本行政区内的森林公园工作”，应由县级至省级人民政府林业主管部门批准建设。

6）地质遗迹保护区按等级分为国家级、省级、县级。对保护区内的地质遗迹可分别实施一级保护、二级保护和三级保护。

一级保护：非经批准不得入内。经设立该级地质遗迹保护区的人民政府地质矿产行政主管部门批准，可组织进行参观、科研或国际交往。

二级保护：经设立该级地质遗迹保护区的人民政府地质矿产行政主管部门批准，可有组织地进行科研、教学、学术交流及适当的旅游活动。

三级保护：经设立该级地质遗迹保护区的人民政府地质矿产行政主管部门批准，可组织开展旅游活动。

在国家级地质公园内进行建设项目时，需要委托相关部门编制评估报告，经评估对地质遗迹无影响或影响很小时，项目经批准后可以在地质公园内建设。

审批权限：涉及列入世界自然遗产名册或者国家级地质公园，经省级国土主管部门报国务院有关行政主管部门审批；涉及省级地质公园，由省级环境保护行政主管部门审批；涉及市（县）级地质公园，由市（县）级环境保护行政主管部门审批。

7）饮用水源保护区按等级分为一级保护区、二级保护区、准保护区。在一级保护区内禁止建设输电线路工程；在二级保护区内和准保护内可以建设输电线路工程，但需办理相关手续，审批权限根据《饮用水水源保护区污染防治管理规定》（环境保护部令 2010 年 16 号修改，自 2010 年 12 月 22 日起施行），各省级人民政府的环境保护部门负责饮用水水源保护区的污染防治工作，并根据当地人民政府的要求制定和颁布地方饮用水水源保护区污染防治管理规定，输电线路建设项目应由当地人民政府至省级人民政府的环境保护部门批准建设。

综上，输电线路在路径选择时应避开环境（生态）敏感区相关法律、法规要求的禁止区域。在环境（生态）敏感区的非禁止区域建设时，应对技术方案进行优化，尽可能减小对生态环境的影响。

第三节 塔基水土保持

输电线路塔基水土保持主要包括塔基范围内环境保护、余土处理及生态植被护坡等主要措施。

一、塔基范围内环保措施

塔基范围内的环保措施主要包括以下几个方面。

（1）基础设计方案，应根据塔位实际条件推荐不等高基础与铁塔全方位长短腿配合使用，减少基础的土石方开挖量。

（2）优先选用原状土基础，土石方工程量小，对环境的破坏较小，有利于水土保持和塔基稳定。

（3）线路塔基基础开挖过程中，应定时洒水使施工区域保持一定的湿度，对施工场地内松散、干涸的表土，也应定时洒水或采取临时覆盖措施防止起尘。

（4）对塔基区采取合理的土地整治措施。塔基区土地整治包括临时堆土、弃渣表面的土地整治。基坑开挖时应将表层的熟土和下部的生土分开堆放。土地整治时，应将熟土覆盖在表层，根据原土地类型，尽量恢复其原来的土地功能。

（5）非农耕区塔基区应进行植被恢复。在施工完成后，应恢复原塔基植被。在植被恢复时应调研塔位所在地区适用的植被和草籽类型，因地制宜地选用该地区适用的草籽类型进行植被恢复，且草籽播撒应尽量选择雨水较充沛的时间。

（6）山区塔基及塔基施工区，在施工前应进行表土剥离、集中堆放，并采取临时拦挡、苫盖和排水等临时措施，施工过程中在施工区设置临时排水沟。对于山丘区陡坡段塔基周边布设浆砌石挡土墙、护坡及截排水工程，截排水沟与自然沟道顺接。灌注桩基础采取泥浆沉淀池防护措施。施工结束后，对施工迹地进行土地整治，复耕或撒播草籽恢复植被。

二、余土处理

余土处理方案应兼顾塔位稳定、环境保护、施工方便等诸多因素。

首先，根据杆塔、基础情况和地形地质情况估算余土方量；

其次，选择余土堆放的位置，计算堆放的大致面积和高度，确定余土处理方案；

最后，确定植被恢复及其他处理措施。

余土堆放位置应尽量选择在塔位水平方向前后侧。对于地形陡峭的塔位，基础开挖过程中产生的余土应随挖随运，不得随意堆放，如有必要应提前设置被动防护网对塔位进行防护。

具体的余土处理方案可按以下原则进行。

（一）平地段

将余土堆放于基础的塔基范围内，堆土高度不得超过主柱顶面，边缘按 1:1.5 放坡，以防止积水，如图 13-1 所示。若塔位处于农田中，则尽量不影响农耕恢复。

（二）丘陵、山地段

1. 岩石类地质条件

（1）对于场地开阔、坡度小于 15° 的塔位，可将余土在塔基范围内平摊堆放，同时做好基面排水，并在施工结束后恢复植被或采取表面固化措施。

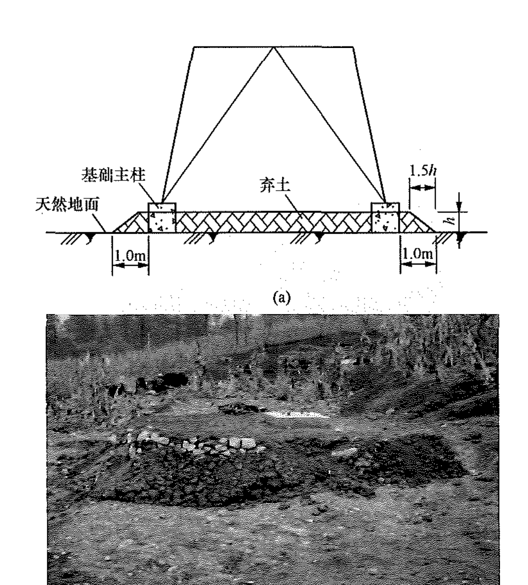


图 13-1 平地余土处理实例

1）地形坡度小于 10° 时。测算余土，计算基础主柱外露高度，在确保基础顶面出露至少 0.2m 且场地不积水的情况下，将余土在塔基范围内堆放成龟背型（堆放土石边缘按 1:1.5 放坡），如图 13-2 所示。

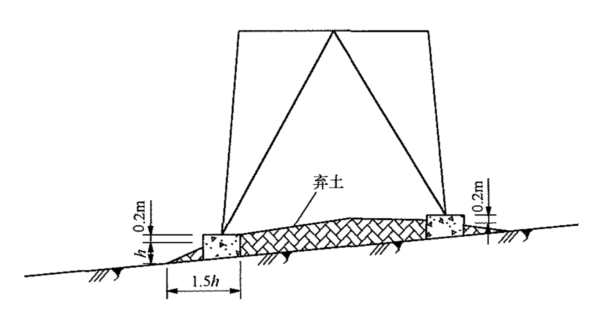


图 13-2 塔位地形坡度小于 10° 时的余土处理方式

采用此方式时，应注意靠下侧边坡的塔腿应适当上抬，防止余土掩埋塔腿。

2）地形坡度在 10° ～15° 时。

i）当塔位地质稳定，余土的滑动不会影响塔基原状土时，应先修筑余土堡坎，方可进行基面平整、基坑开挖等土石方工程施工，如图 13-3 所示。

ii）当塔位地质疏松不稳定，余土的滑动可能会带动塔基原状土一起滑动时，在远离塔位的下坡位置设置余土堡坎，如图 13-4 所示。

（2）对于地形坡度在 15° ～25° 的塔位，应会同岩土专业对塔位附近的地形进行勘察，在远离塔位的下坡处选择恰当的位置设置余土堡坎（堡坎必须满足在基岩内的嵌固深度且自身稳定），如图 13-5 所示。

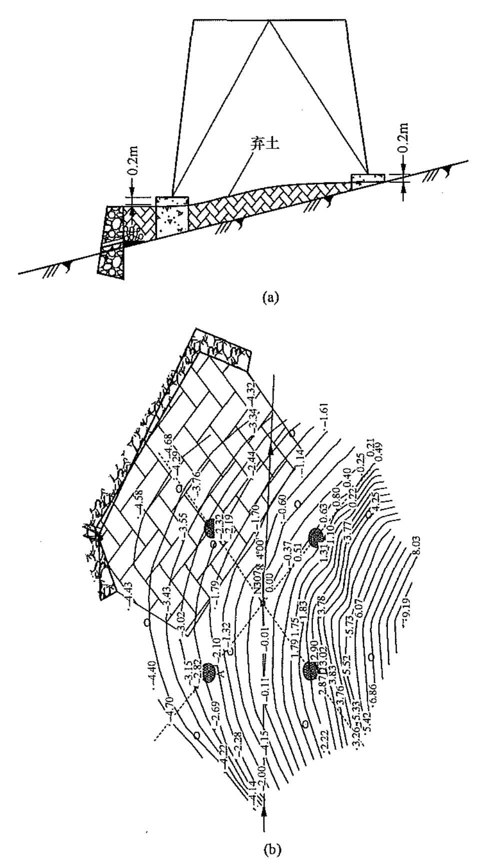


图 13-3 塔位地形坡度在 10° ～15° 时的余土处理方式 1
（a）断面示意图；（b）地形示意图

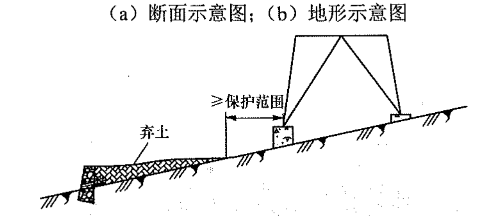


图 13-4 塔位地形坡度在 10° ～15° 时的余土处理方式 2

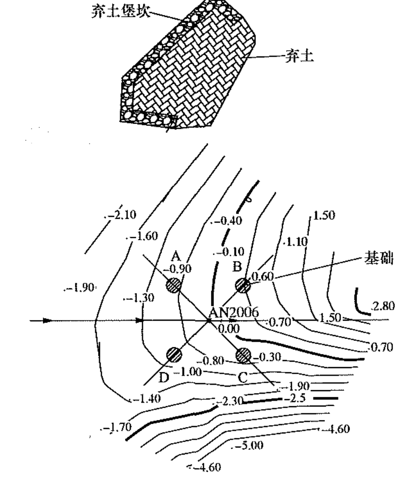


图 13-5 余土堡坎设置示意图

（3）地形坡度大于 25° 的塔位，不应直接顺坡堆放余土，且不宜在塔位 30m 范围内堆放余土。应会同地质专业在塔位下方或侧面选择地形坡度 25° 以下、合适的位置设置余土堡坎堆放余土。

2. 黏性土、黄土类地质条件

（1）对于场地开阔、坡度在 20° 以内的塔位，可将余土在塔基范围内平摊堆放，并做好基面排水，在施工结束后恢复原始植被。

（2）对于地形坡度为 20°～30° 的塔位，尽量在塔位附近选择较平缓的位置设置余土堡坎（堡坎必须满足在原状土内的埋置深度且自身稳定，高度一般不超过 3m），将余土堆放到堡坎内，并做好基面排水，在施工结束后恢复原始植被。

（3）对于地形坡度超过 30° 的塔位，应将余土及时外运至远离塔位的合适位置处堆放。

三、生态植被护坡

生态植被护坡是随着人们环保意识和技术水平的提高，提出的一种集边坡加固、植被防护和环境美化于一体的复合防护技术。它不仅可以起到稳固坡体上的土体，还可以通过植被的恢复，美化环境。

植被固坡适用于开挖后风化严重的岩质边坡和坡面稳定的较高土质边坡。主要分直接喷播（客土、湿法）、土工格室和格构植被护坡等形式，如图 13-6 所示。

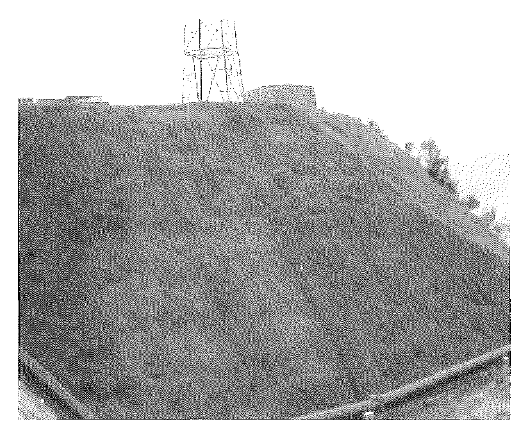


图 13-6　植被护坡实例

（1）浆砌骨架植草护坡。

浆砌骨架植草护坡是指采用浆砌片石在坡面上形成骨架，在骨架内的空格内栽植植被，有些坡体施工时空格要先回填客土。常用骨架形状有方格、拱形、人字形等。适用于各种地区和土质边坡强风化的岩石边坡也可采用。常用坡率为 1:1.0～1:1.2。块石骨架断面一般为 400～500mm，埋入土中 300mm。实例如图 13-7 所示。

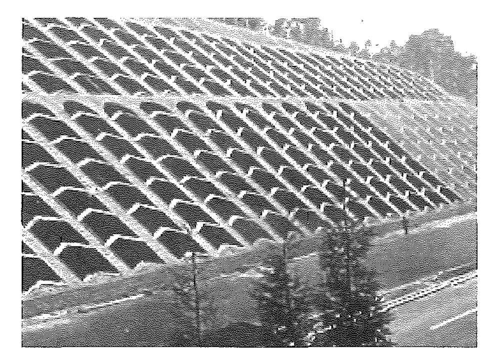


图 13-7　浆砌骨架植草护坡实例

（2）三维土工网植被护坡。

三维植被网是以热塑树脂为原料，采用科学配方经过初拉伸等工序精制而成。三维植被网的底层为一个高模量基础层，采用双向拉伸技术，强度高，可以防止植被网变形，并能有效防止水土流失。三维植被网的初始功能是有利于植被生长。随着植被的形成，它的主要功能是帮助草根系统增强抵抗自然水土流失的能力。通过植物的生长活动达到根系加筋、茎叶防冲蚀的目的，经过生态护坡技术处理，可在坡面形成茂密的植被覆盖，在表土层形成盘根错节的根系，有效抑制暴雨径流对边坡的侵蚀，增加土体的抗剪强度，减小孔隙水压力和土体自重力，从而大幅度提高边坡的稳定性和抗冲刷能力。

三维植被网的坡面结构如图 13-8 所示。三维植被网护坡的施工流程为：修整边坡、铺网、钉网锚固、覆土、植草喷播、养护等。

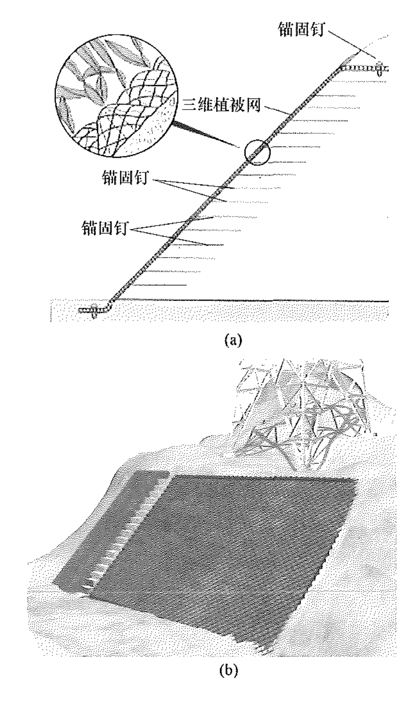


图 13-8　三维植被网的坡面结构



选 线 及 定 位

选线就是在线路起讫点间选出符合国家建设各项方针政策及规程规范要求，经济合理，施工方便，运行安全的输电线路路径。定位则是在已经选好的线路路径上，进行定线、断面测绘，在纵断面图上配置杆塔，并现场测定位置，设定塔位标桩的过程。选线和定位是输电线路设计的两个重要环节。选线和定位的质量直接关系到线路的造价和施工、运行的方便与安全。

第一节　选　　线

选线工作通常分为初勘选线和终勘选线两个阶段。初勘选线是指在可行性研究或初步设计阶段经图上选线、收资协议和现场踏勘确定的初步路径方案的过程。终勘选线是指将初勘选线确定经审查批准的路径在现场落实，按实际地形地貌及自然条件修正后，确定线路最终走向，并设立临时标桩的过程。

一、初勘选线

（一）图上选线

图上选线是进行大方案的比较，从若干个路径方案中，经比较后选出较好的线路路径方案。图上选线的方法步骤如下：

（1）图上选线前应充分了解工程概况及系统规划，明确线路起讫点及中途必经点的位置、线路输送容量、电压等级、回路数与导线型号等设计条件。

（2）图上选线所用地形图、高清卫片或航片的比例以 1:5 万或 1:10 万为宜。先在图上标出线路起讫点及中间必经点位置，以及预先了解到的有关城市规划，军事设施，城镇规划、工厂、矿山发展规划，地下埋藏资源开采范围，水利设施规划，林区及经济作物区，已有及拟建的电力线、通信线或其他重要管线等的位置、范围。然后按照线路起讫点间距离最短的原则，尽量避开上述影响范围，考虑地形、交通条件等因素，绘出若干个图上选线方案（一般经反复比较后保留 2 个及以上方案）作为收资及初勘方案。

（3）对已选定的路径方案，根据与通信线的相对位置，远景系统规划的短路电流及该地区大地导电率情况计算对铁路、通信、军事等主要通信线的干扰及危险影响。根据计算结果，对已选定的路径方案进行修正或提出具体措施。详见第六章对通信线路的影响及其保护。

（二）收资协议及初勘

1. 收资协议

收资协议的主要目的是要取得线路通过地区对路径有影响的地上、地下障碍物的有关资料及所属单位对路径通过的意见。由所属单位以书面文件或在路径图上签署意见的形式提供资料，作为设计依据。若同一地区涉及单位较多又相互关联时，可邀集有关单位共同协商，并形成会议纪要。如果最终的路径走向满足对方的要求，可不再办理手续。但当路径靠近障碍物的边沿或厂、矿区内通过时，应在线路施工图设计后以“回文”（或兼附图）的形式说明路径通过位置及要求，以防对方将来有可能发展时影响线路的建设与安全运行。

收资协议阶段，调查了解的单位一般应包括大行政区及省、市地区的有关部门和重要厂、矿企业及军事部门。收资协议的内容一般为有关部门所属现有设施及发展规模、占地范围、对线路的技术要求及意见等。在取得对方的书面意见前，应充分了解对方的设施情况与要求，并详细向对方介绍线路的情况，在协商的基础上取得对方同意线路通过的书面意见。

收资协议的单位与内容参见第二章第三节。

2. 初勘

初勘是按图上选定的线路路径到现场进行实地勘察，以验证它是否符合客观实际并决定各方案的取舍。初勘方法可以是沿线了解、重点勘察或仪器初测，按实际需要确定。野外初勘应由输电专业设计（包括电气、土建、通信保护）、技经、测量、水文、地质等专业的人员组成，必要时邀请施工、运行单位参加。初勘工作一般应包括如下内容：

（1）应根据地形、地物找出图上选线的实地位置

并沿线勘察；对特殊跨越，应进行实地选线、定线、平断面图草测及地质水文勘察；在某些协议区及复杂地段，需要将线路路径或具体塔位，用仪器测量落实或测绘有关平断面图。

（2）由收资、协议人员到沿线的县、乡及有关厂、矿补充收集沿线有影响的障碍物、设施资料与办理初步协议，并收集沿线交通、污秽等资料。

（3）重点踏勘可能影响路径方案的复杂地段及仅凭图纸资料难以落实路径位置的地段。通常包括：重要或特殊跨越；进出线走廊、城镇拥挤地段；穿越或靠近有影响的障碍物协议区；不良地质、恶劣气象地段及交通困难、地形复杂地段；可能出现多方案地段。

（4）初勘时各有关专业组尚应做好拆迁、砍树（范围、树种、高度）、修桥补路、所需建筑材料产地、材料站设置及运距的调查。

初勘结束后，根据初勘中获得的新资料修正图上选线路径方案，并组织各专业进行方案比较，包括：线路长度、交通运输条件、施工、运行条件、地形、地质条件、大跨越情况等技术比较；线路投资、年运行费、拆迁赔偿和材料消耗量等经济比较。按比较结果提出可行性研究或初步设计的推荐路径方案，编写路径部分说明并整理有关协议文件，同时办理最终协议文件。

二、终勘选线

终勘选线工作对线路的经济、技术指标和施工、运行条件起着重要作用。因此，要正确地处理各因素的关系，选出一条既在经济技术上合理，又方便施工、运行的线路路径。

终勘选线一般应在线路终勘定线前进行，也可以与定线工作合并进行，需视线路的复杂程度而定。在选线中应做到“以线为主、线中有位”，即在选线中要兼顾杆（塔）位的技术经济合理性和关键塔位成立的可能性（如转角点、大档距和必须设立杆塔的特殊地点等），个别特殊地段应反复选线比较，必要时草测断面进行排位比较后优选。终勘选线遵循的基本原则参见第二章。

终勘选线应满足以下技术要求。

1. 山区路径选择

（1）线路经过山区时，应避免通过陡坡，悬崖峭壁、滑坡、崩塌区、不稳定岩石堆、泥石流、喀斯特溶洞等不良地质地带。当线路与山脊交叉时，应尽量从平缓处通过。

（2）在山区选线应从技术经济与施工运行条件上做好方案比较。努力做到既合理地缩短路径长度、降低线路投资又保证线路安全可靠、运行方便。

（3）山区河流多为间歇性河流，其特点是流速大、冲刷力强。因此，线路应避免沿山间干河沟通过，如必须通过时，塔位应设在最高洪水位以上不受冲刷的地方。

2. 跨河段路径选择

（1）线路跨越河流（包括季节性河流）时，尽量选在河道狭窄、河床平直、河岸稳定、两岸尽可能不被洪水淹没的地段。

（2）选线时应调查了解洪水淹没范围及冲刷等情况，预估跨河塔位并草测跨越档距，尽量避免出现特殊塔的设计。

（3）应避免与一条河流多次交叉。

（4）避免在支流入口处及河道弯曲处跨越河流，应尽量避开旧河道或排洪道和在洪水期容易改为主河道的地方。

（5）不要在码头和泊船地区跨越河流。

（6）跨河塔位的地质条件：

1）河岸地层稳定，无严重的河岸冲刷现象（如蛇曲、塌岸等）；

2）两岸土质均匀良好，无软弱地层（如淤泥或淤泥质土）及易产生液化的饱和砂土；

3）地下水埋藏较深。

3. 转角点选择

（1）转角点不宜选在山顶、深沟、河岸、悬崖边缘、坡度较大的山坡，以及易被洪水淹没、冲刷和低洼积水之处；并应尽量与其他技术要求而需设置耐张杆（塔）结合起来考虑。

（2）线路转角点应放置在平地或山麓缓坡上，并应考虑有足够的施工场地和便于施工机械的进出（悬垂塔允许紧线作业者例外）。

（3）选择转角点时应考虑前后相邻两基杆（塔）位的合理性，以免造成相邻两档过大、过小从而升高杆塔或增加杆塔数量等不合理现象。

4. 通过特殊地带的路径选择

（1）线路通过矿区应尽量避开爆炸开采的爆炸影响范围、未稳定的塌陷区及可能塌陷的地区。

（2）线路经过大孔性黄土地区时，应尽量避开冲沟特别发育的地段，要特别注意立塔条件，选线时就要考虑排塔位情况，做到“线中有位”。

（3）线路应尽量避开沼泽池、水草地、已大量积水或易积水及严重的盐碱地带。

（4）线路与喷水池、冷却塔及生产过程中能排出腐蚀性气体或液体的工厂接近时，要查明其危害范围，分析其危害程度。并尽量使线路与这些工厂保持必要的距离，最好在上风向通过，以减少或避开其影响。

（5）线路尚应注意与采石场、油库等障碍物设施安全距离要求，具体见第二章第三节。

5. 跨越电力线路路径选择

（1）拟建线路与已投运的同电压等级线路交叉时，首选钻越方案，在不具备钻越条件的前提下，才考虑合理采用跨越方案；在与规划的同等级高压线路或低电压线路交叉时，要为远期线路预留钻越通道。

（2）在跨（钻）越方案确定后，详细调查资产权属，在被跨线路停电困难，不具备带电跨越施工的区段，选线阶段即采取控制耐张段长、尽量加大交叉角度、缩短跨越档距等一系列措施，便于封网带电跨越施工尽量减少被跨线路的带电跨越施工周期。

（3）对于火电送出及多回同向送出等重要线路，通过在并行线路间设置塔位的措施，尽可能避免一档同时跨越多回线路情况，为实施多线轮停创造条件。

6. 跨越高速公路、重要铁路段路径选择

（1）线路跨越高速公路、重要铁路路径选择方案需满足主管单位要求和相关规程规定。

（2）尽量避免在同一档内和同一耐张段内同时跨越多处高速公路、重要铁路等情况。

（3）跨越铁路段路径选择时，应尽量避免线路从信号灯、桥涵、接触线锚段附近跨越。

（4）跨越高速公路段路径选择时，应尽量避免线路跨越高速公路联络线、互通和立交桥等情况。

（5）线路与主干铁路、高速公路及重要输电线路交叉，应采用独立耐张段。

7. 利用卫片和航片配合地形图选线

目前，随着技术手段的不断发展和进步，高清卫片和航片在工程中已经普遍采用。利用高清卫片和航片配合地形图选择路径，能更好地保证路径质量，尤其是在高山大岭、人烟稀少、工作生活条件困难的地方或路径受协议、地形、地物控制的地方，利用高清卫片和航片选线其优越性更加突出，既方便快捷又可提高选线精度，实现技术经济与方案合理的双重统一。

第二节 定 位

定位工作，一般分为排位和现场定位两部分内容。排位是指在纵断面图上进行塔位优化选择的过程，现场定位是将排位后成果现场实际勘测并进行必要调整，最终确定塔位的过程，二者始终贯穿于线路定位的全过程。

一、定位准备工作

为了便于定位工作的顺利进行，需要事先将线路主要的有关技术资料、要求及注意事项汇编成《线路工程定位手册》，并准备好必要的工具，如弧垂模板及有关计算工具、空白的塔（杆）位明细表（见图 14-1）等。《线路工程定位线路手册》一般包括下列几方面内容：

（1）线路概要，如线路电压等级、起讫点、回路数、长度及选线、定位的主要设计原则等。

（2）送、受电端的进出线平断面图或进出线架构数据，如构架位置、挂线点标高、线间距离、相序排列及允许张力等。

（3）导线、地线型号及力学特性曲线，如使用两种或两种以上的不同电线型号或应力标准时，应标明各自架设的区段。

（4）悬垂绝缘子串型式、串长及使用地点，如有加强绝缘区段，应说明绝缘子型式、串长、片数及使用地点和附加要求。

（5）防振措施的安装规定。

（6）按档距长度需要安装间隔棒的数量。

（7）全线计划换位系统图及换位塔位的附加要求。

（8）不同气象区分段（如有两种或两种以上气象区时）。

（9）各型杆塔接地装置选配一览表及接地装置型式选配的有关规定。

（10）各种悬垂绝缘子串允许的垂直档距。

（11）线路采用飞车进行带电作业时，与被跨越线路交叉垂直距离的规定。

（12）各队划分（两个及以上勘测队）及标桩编号的有关规定。

（13）杆塔及基础使用条件一览表（见图 14-2）。

（14）导线对地及对各种交叉物的距离及交叉跨越方式的要求。

（15）各型杆塔使用的原则（各型杆塔使用地点及其要求）。

（16）耐张段长度的有关规定。

（17）线路纵断面图的比例、图幅及边线测量的有关要求。

（18）定位使用的模板 K 值曲线、摇摆角等各种校验曲线及图表。

（19）对地裕度及有关交叉跨越特殊校验条件的规定。

（20）对各型转角杆（塔）位位移距离的规定。

（21）采用重锤片数的计算原则。

（22）线路边导线与建筑物之间距离的有关规定。

（23）基础型式的选用原则。

（24）通信保护要求明确一、二级通信线的位置。

（25）其他特殊要求。

线路塔（杆）位明细表

设计　　　　校核

耐张段长	代表档距	塔位里程	运行塔号	设计塔号	杆塔型式	呼称高	档距	转角度数	水平档距	垂直档距	设计高差	接地型式	导线金具串（悬挂方式×每基组数×每组片（支）数及绝缘子型式）	重锤片数	地线金具串		分流线金具串		防振锤			导地线接头情况	间隔棒	被交叉跨（穿）越物名称及保护措施	备注
															悬垂	耐张	悬垂	耐张	导线	地线	分流线				
（m）	（m）	（百米+m）				（m）	（m）	度分	（m）	（m）	（m）			（片/相）	（组/基）		（组/基）		（个/基）				（个/档）		

填表说明：1. 设计高差栏填写“–”值时，代表基础加高。

2. 导线、地线不许接头时，应在导线与地线接头栏填入“不许”二字。

3. 间隔棒栏内应填写：导线分裂相（极）数×n [n为档内每相（极）用量]。

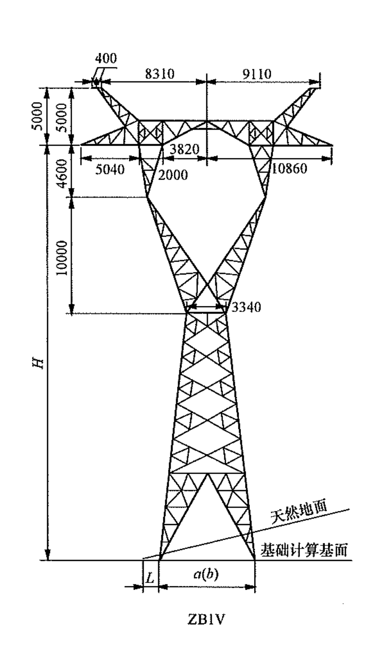
4. 被跨越设施名称及保护措施填写被跨越电力线、通信线、果园、铁路、公路、鱼塘及特殊跨越物等信息。

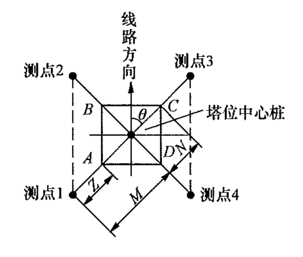
5. 备注栏一般填写塔（杆）位有否变动、转角、换位杆塔位移距离、气象区分界点、不同地线（包括 OPGW）架设范围及不同导线的分界点等需特殊说明的事项。

6. 本表仅供参考，根据工程需要可增加相应内容。

图 14-1　线路塔（杆）位明细表

塔型	呼称高(m)	使用档距(m)		半根开(m)		高低腿	测定基面有关参数					塔重(kg)
		水平	垂直	正面 $a/2$	侧面 $b/2$		L(m)	Z(m)	M(m)	N(m)	θ(°)	
ZB1V	27	460	550	2.85	2.44	无	3.4	4.80	8.55	3.75	51	9000
	30			3.14	2.66				8.92	4.12		9621
	33			3.43	2.88				9.28	4.48		10272
	36			3.72	3.09				9.64	4.84		11078
	39	410		4.01	3.31				10.00	5.20		12006
	42			4.30	3.53				10.36	5.56		12844





说明：1.测点1~4为线路左(右)侧山坡下方最低的一个测点与塔位中心桩间高差值即为基础计算施工基面。
2.为确定多方位高低腿的使用，必须测定A、B、C、D各点及分别以A、B、C、D各点为圆心，以Z为半径的圆上的最低点处与中心桩间的高差值，共测量8点。

图 14-2 杆塔及基础使用条件一览表

二、定位方法

定位是一项实践性很强的技术工作，这主要是因为现场地形地物千变万化，而塔位、塔高及塔型等，必须根据这些千差万别的情况合理安排，才能做出质量优良技术经济合理的设计。定位方法共有以下四种。

（一）室内定位法

由勘测人员在现场进行勘测，回院后提出勘测资料（包括测量、水文、地质资料），供设计人员进行排位。然后再到现场交桩修正部分塔位。

室内定位法的主要特点是测断面、定位、交桩三工序串接进行。因而工序流程时间较长，近年来工程上已很少采用。

（二）人工现场定位法

由测量、地质、水文、设计人员在现场边测断面边定塔位。定位后按塔位进行地质鉴定，供设计基础及选配接地装置用。

现场定位法的主要特点是测断面、定位、交桩三项工作在一道工序内完成，工序简单。此定位法的另一特点是具有以位正线的反馈作用。所谓以位正线的反馈作用，是指在定位过程中，当发现某些塔位非常不合理而通过修改部分路径来解决才比较合适时，可及时对该段路径进行修改。这一点之所以在现场定位中易于实现，主要是因为选线、断面、定位在同一现场，同一段时间内进行，各组之间的联系较为及时。其缺点则主要是不能对整个定位段进行方案比较，因而其经济合理性差。一般常在 220kV 以下工程中采用，现场定位法的大致工序如下：

（1）先由定线组按选线确定的方向和目标定出线路中心线，并埋设直线桩和转角桩，测得各标桩的距离、高程并标注在线路断面图上。

（2）定位组测量人员从起始塔位（如转角点）开始沿线路进行方向，向前测绘出 1～2 档的轮廓纵断面。将测点绘于米格纸断面图上。

（3）定位组设计人员预估代表档距，选出相应 K 值的弧垂模板，在断面图上比拟出杆塔的大约位置，并根据弧垂曲线补测控制点的距离及高程，添绘于断面图上。

（4）排出塔位位置，查看施工、运行条件，按定位手册要求的内容对各项使用条件进行检查，满足要求后，埋设塔位中心桩及塔号桩并实测档距、高程、施工基面、高低腿等，将测量结果填入断面图。

（5）在测定 1～2 个耐张段后，应在室内进行仔细校核、验算并反复进行定位方案比较，如发现原定方案不够经济、合理，应以新的定位方案重返现场修改，并拔掉原定塔位标桩，以免施工弄错。

（6）根据塔位地质情况，选配接地装置及基础型式，填写塔位明细表，整理断面图等内业工作。

（三）现场室内定位法

测量人员先在现场测平断面，所测平断面够一定位段后（如两转角塔之间或两死塔位之间，一般是 3～8km），即交设计人员在现场住地进行室内排位，然后共同到现场交桩。同时由地质、水文人员按塔位进行地质、水文鉴定。

现场室内定位法的主要特点是测断面、定位、交

桩三工序可平行交叉进行，因而工序流程时间接近于现场定位，较院内定位法时间要短得多。另外，也具有以位正线的反馈作用。一般对投资较高的220kV及以上线路多采用现场室内定位法，其工序如下：

（1）在定线的同时测绘线路断面图。此时室内定位人员最好参加断面测绘工作，了解沿线地形、地物，对可能立塔地段做到心中有数，并做好调查和记录，掌握图纸难以反映但对定位有密切关系的感性材料。

（2）在测完一定位段的断面图后，定位人员在断面图上试排塔位，反复进行塔位方案比较及各项验算，最后定出一个技术经济比较合理的方案。

（3）由现场定位组（或原定线、断面组）将室内定位方案拿到现场实地验证，逐塔查看塔位处的施工、运行条件、校测和补测危险点和控制点断面，根据实际情况调整室内定位方案，埋设塔位标桩，测量施工基面、高低腿等，并填绘于断面图上。

（4）进行内业整理，填写塔位明细表，加工整理断面图。

（四）一次定位法

随着全数字摄影测量技术在工程中的推广应用，勘测人员应用高清卫片或航片，获得线路的断面数据。设计人员通过排位优化后，现场直接人工交桩，根据现场塔位情况进行调整或修正，实现现场一次完成定位工作。

一般情况下，此种方法适用于具备高清卫片或航片数据，能够提取出供设计人员利用断面数据的工程。这种方法在地形起伏较大的地区可减轻勘测及设计人员的劳动强度，更具优越性。

三、断面图测绘要求

线路断面图包括线路纵断面图、个别横断面图、线路带状平面图，均为定位的主要资料，示例如图14-3所示。

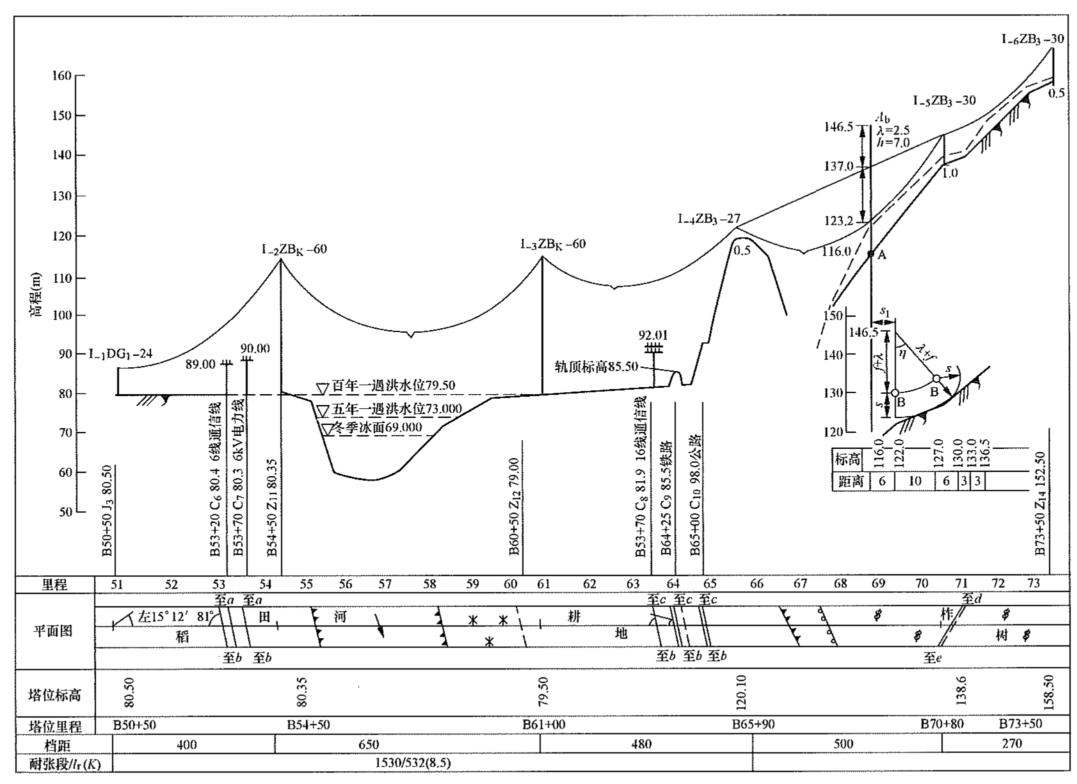


图14-3 线路平断面定位图示例

（一）线路纵断面、平面图

（1）线路纵断面图表示沿线路中心线（及高边线）的地形起伏变化的形状、高程和交叉跨越物的位置及高程。弧垂对地面最近的区段断面点应适当加密，并应保证高程误差不超过±0.5m。

（2）纵断面图使用毫米方格纸，其比例一般采用：纵为1/500，横为1/5000或纵为1/200，横为1/2000。

（3）在纵断面图下方还应绘制沿线路中心线左右各50m（特高压线路75m）范围内的平面图。在平面图上绘出：线路转角塔位的转角度数；杆塔位置；交叉跨越物（电力线、通信线、铁路、道路、河流、地上、下管道等）与线路的交叉角度、去向或与线路平

行接近的位置、长度；线路中心线附近的建筑物位置和接近距离；陡坡、冲沟、坟地的位置、范围；耕地、树林、沼泽地等的位置和边界。

(4) 纵断面图下方需要标注：里程（百米值）、塔位标高、杆塔档距、耐张段长度、代表档距及弧垂模板 K 值；在断面图中标注杆塔转角、直线桩里程、标高，交叉跨越物的里程、标高、名称；在图上绘出杆塔位置、定位高度，弧垂安全地面线，标注杆塔编号、型号、呼称高及施工基面等数据。

此外，对于重要交叉跨越（如跨越铁路、高速公路及一、二级通信线等）尚应有交叉跨越分图供施工协议用（分图比例同纵断面图）。

（二）线路横断面图

当线路沿着大于 1:4 的边坡或其他对风偏有影响的山坡通过时，应实测与线路垂直的横断面以检查风偏影响。横断面绘于纵断面图相应位置的上方，其纵横比例尺一律为 1:500。测量宽度应视现场地形确定，一般为 40m 左右。

四、定位弧垂模板的制作与使用

为便于按导线对地距离及对障碍物的距离要求配置塔位，可事先按导线安装后的实际最大弧垂形状，作成弧垂模板以比量档内导线各点对地及对障碍物的垂直间距。

（一）弧垂模板的刻制

悬挂的导线呈悬链线状，其弧垂公式为

$$\left.\begin{aligned} f_c &= \frac{\sigma_c}{\gamma_c}\times\left(\mathrm{ch}\frac{\gamma_c l}{2\sigma_c}-1\right)=\frac{\gamma_c l^2}{8\sigma_c}+\frac{\gamma_c^3 l^4}{384\sigma_c^3} \\ &= Kl^2+\frac{4}{3l^2}\times(Kl^2)^3 \end{aligned}\right\} \quad (14\text{-}1)$$

$$K=\frac{\gamma_c}{8\sigma_c}=\frac{P_c}{8T_c}$$

式中 f_c——导线最大弧垂，m；

σ_c、T_c——导线最大弧垂时的应力（N/mm²），张力（N）；

γ_c、P_c——导线最大弧垂时比载（N/m·mm²），单位荷载（N/m）；

l——档距，m。

由上式可见，只要 $\frac{\gamma_c}{\sigma_c}$ 相同，不论任何导线，其弧垂形状完全相同，因此可按不同的 K 值以 l 为横坐标，f_c 为纵坐标（档距中央为坐标原点），采用与线路纵断面图相同的纵、横比例做出一组弧垂曲线，并刻制成透明的（一般为 1～2mm 厚的赛璐珞）模板，如图 14-4 所示，通常称为通用弧垂模板。对钢芯铝绞线 K 值一般在 4×10^{-5}～15×10^{-5}（1/m）之间，可每隔 0.25×10^{-5} 作一曲线，每块模板上可做 2～4 条曲线。

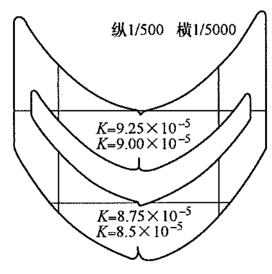


图 14-4 通用弧垂模板

（二）不同比例的模板 K 值换算

在定位时如没有与断面图比例尺一致的弧垂模板时，亦可按导线弧垂曲线形状相同的原则选用其他比例尺的等价 K 值模板，其相互关系如式（14-2）所示。

$$K_x=\left(\frac{m_a}{m_x}\right)^2\times\frac{n_x}{n_a}K_a \quad (14\text{-}2)$$

式中 K_a——比例为纵 $1/n_a$、横 $1/m_a$ 的模板 K 值；

K_x——K_a 值换算至模板（或断面图）比例为纵 $1/n_x$、横 $1/m_x$ 的等价 K 值。

例如有一块 $m_a=2000$，$n_a=200$，$K_a=20\times10^{-5}$ 模板，要用到断面图比例 $m_x=5000$，$n_x=500$ 的图纸上，求它相当于多少 K_x 值。根据上式计算可得 $K_x=0.4\times20\times10^{-5}=8.0\times10^{-5}$。即一块纵为 1/200、横为 1/2000，$K=20\times10^{-5}$ 的模板，在一张纵为 1/500、横为 1/5000 的断面图上可当 $K=8\times10^{-5}$ 的模板用。

（三）定位模板的使用

1. 模板的选用

由于各耐张段的代表档距不同，所用的模板 K 值亦不同（弯曲度不同）。为便于定位时选择模板，可事先根据不同代表档距下，导线最大弧垂时的应力和比载，算出如图 14-5 中所示模板的 K 值曲线。

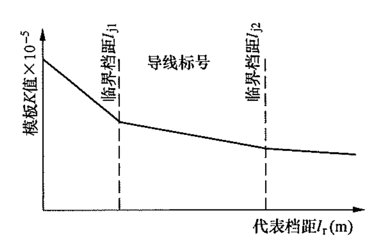


图 14-5 模板 K 值曲线

开始定位时，可先根据地形及常用的各种杆塔排位来预估待定耐张段的代表档距，并从 K 值曲线中查出初步选用的模板。整个耐张段定位完毕后，应计算实际的代表档距 $l_r^2=\left(\frac{\sum l^3}{\sum l}\right)$、核对所估选的模板是否正确，其误差应在 $+0.2\times10^{-5}$～-0.05×10^{-5} 以内，否则应按实际模板 K 值重新画弧垂线（即断面图中的安全地面线）并调整杆位、杆高，重新计算代表档距，

直至所选用的模板与最终确定的代表档距相符为止。

2. 杆塔定位高度

杆塔的高度主要是根据导线对地面的允许距离决定的。为了便于检查导线各点对地的距离，通常在断面图上绘制的弧垂曲线并非导线的真实高度，而是导线的对地安全线，即将导线在杆塔上向下移动一段对地距离值后，画出的弧垂曲线，如图 14-6 所示，只要该线不切地面，即满足对地距离要求。

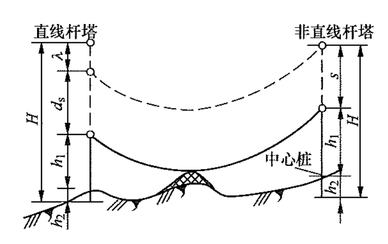


图 14-6 导线有效定位高度示意图

H—呼称高；s—对地安全距离；λ—悬垂绝缘子串长；δ—考虑各种误差而采取的定位裕度；h_2—杆塔施工基面

杆塔定位高度 h_1：

对悬垂杆塔：$h_1=H-s-\lambda-\delta-h_2$。

对非悬垂杆塔：$h_1=H-s-\delta-h_2$。

导线对地距离 s 参见表 14-2，不同档内若对地距离不同，定位高度中应考虑相应的 s。

考虑到勘测设计及施工误差，定位时应根据档距的大小预留定位裕度δ，一般档距 700m 以下取 1.0m，大于 700m 及孤立档取 1.5m，大跨越取 2～3m。

五、定位的原则

（一）杆（塔）位的选定原则

（1）应尽量少占耕地和好地；减少土石方量。

（2）杆塔位应尽可能避开洼地、泥塘、水库、冲沟发育地段、断层等水文、地质条件不良的处所，对于带拉线的杆塔还应考虑打拉线处的条件。

（3）应具有较好的施工［组、立杆（塔）和紧线］条件。

（二）档距的配置

（1）最大限度地利用杆塔强度，并严格控制杆塔使用条件。

（2）相邻档距的大小不应悬殊，以免纵向不平衡张力过大。

（3）当不同的杆（塔）型或不同的导线排列方式相邻时，应考虑到档中导线的接近情况确定档距的大小，如换位杆（塔）间由于导线的交叉要适当减小档距。

（4）当杆塔的摇摆角不足时，应首先考虑在不增加杆（塔）高的情况下调整杆（塔）位和档距来解决。

（5）尽量避免出现孤立档（特别是小档距孤立档）。

（三）杆塔的选用

（1）尽可能地选用最经济的杆塔型式或高度，充分利用杆塔的使用荷载条件。

（2）尽量避免特殊设计杆塔，对较大转角杆塔应尽量降低杆塔高度。

（3）为充分利用地形、排位；高、矮塔应尽量配合使用。

六、手工排位

在计算机广泛应用之前，手工排位在输电线路设计工作中不可或缺，电气专业根据测量专业提供的手工断面图，结合线路地形、走廊内障碍物信息，选用适宜本工程的常用杆塔，预估待定耐张段的代表档距，初选模板 K 值进行初步排位。整个耐张段初步排位完毕后，应计算实际的代表档距、核对所估选的模板是否正确，并调整杆位、杆高等完成手工排位。直至 20 世纪 90 年代，随着计算机的不断普及，手工排位逐渐被计算机排位所取代。

七、计算机排位优化

计算机排位利用勘测数据及相关的经济、技术参数，按照有关规程及标准，根据动态规划的原理，由计算机排出全线或指定区段累计造价最低的方案，供现场交桩使用。并通过与制图软件接口绘制杆塔塔位明细表和平断面定位图。计算机优化排位典型流程如图 14-7 所示。

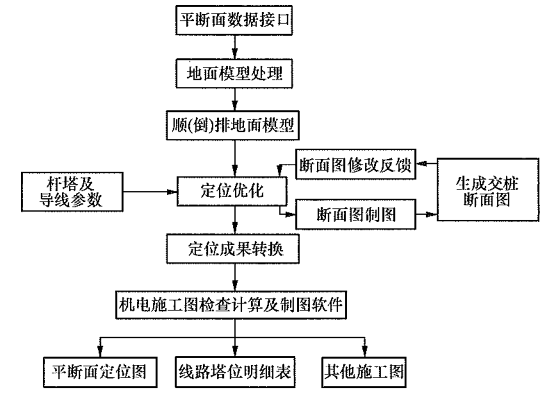


图 14-7 计算机优化排位典型流程图

八、定位结果检查

定位结果检查一般分为手工检查和计算机检查两种方法。手工检查及计算是计算机检查的基础，随着计算机的普遍应用，定位检查项目已经可以实现逐塔验算，本书重点介绍手工检查方法。

在初步确定杆塔位置、型式、高度后，应对线路设计条件进行全面检查，以验证是否超过设计规定的允许条件。检查内容包括以下几方面。

（一）杆塔使用条件检查

1. 杆塔荷载条件检查

杆塔荷载条件检查，包括垂直档距、水平档距、最大档距、转角度数等，均不应超过设计条件。

水平档距为相邻档距的平均值，当高差特大时应取两档悬挂点连线间的距离平均值。

最大档距为两相邻杆塔间的距离，其大小受线间距离控制。对特大档距的线间距离要进行验算。

垂直档距为杆塔两侧导线弧垂最低点间的水平距离，此值可由断面图上量得。但断面图上量得的垂直档距系最大弧垂时的数值，当此值接近或超过杆塔设计条件时，应通过式（14-3）计算与杆塔设计条件相同的气象条件（如覆冰、最大风速、最低气温等）下的垂直档距 l_v，应使 l_v 不超过设计条件。

$$l_v = l_h + \frac{\sigma_1 h_1}{\gamma_v l_1} + \frac{\sigma_2 h_2}{\gamma_v l_2} \tag{14-3}$$

式中 l_h——杆塔的水平档距，m；

l_1、l_2——杆塔前后侧的档距，m；

σ_1、σ_2——分别为杆塔两侧，待求情况下的导线水平应力（当为悬垂杆塔时 $\sigma_1=\sigma_2=\sigma$），N/mm^2；

h_1、h_2——杆塔导线悬挂点与前后邻塔悬挂点间之高差，比邻塔高为正值，反之为负值，m；

γ_v——待求情况下的导线垂直比载，$N/(m \cdot mm^2)$。

2. 各种运行情况下绝缘子串与杆塔构件间安全间隙的检查

对采用悬式绝缘子串的悬垂杆塔，应保证在各种运行情况下（外过电压、内过电压、正常工作电压及带电检修时），绝缘子串与杆塔构件间保证必要的空气间隙（参见第三章和第四章）。

定位时应用绝缘子串摇摆角临界曲线逐杆（塔）校验绝缘子串的摇摆角是否满足设计要求。

摇摆角临界曲线的计算、绘制、使用方法如下：

（1）根据杆塔头部结构尺寸及各种运行情况下的允许空气间隙（R_1～R_4），作图量出外过电压、内过电压、正常工作电压及带电检修时的最大允许摇摆角 φ_1～φ_4，如图 14-8 所示。

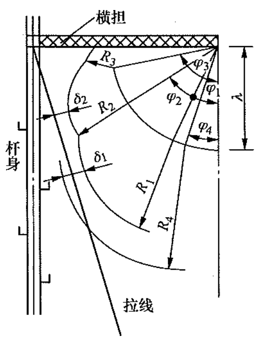


图 14-8 拉线塔最大允许摇摆角示意图

对宽身及拉线杆塔，在绘制最大允许摇摆角时，尚应考虑导线在塔身边缘（如瓶口、横担及拉线）附近，由于上扬或下垂在风偏时对构件接近的影响而预留一定的裕度δ（见图 14-8 及图 14-9）。对拉线塔δ的计算参见第三章，对宽身塔δ一般可视不同接近位置取 100～300mm，或按式（14-4）计算。

$$\delta = a_r b\cos\beta + \frac{b\gamma l}{2\sigma}\times\cos(\beta-\varphi) + R\left\{\sqrt{1+\left[a_r\cos\beta+\frac{\gamma l}{2\sigma}\cos(\beta-\varphi)\right]^2}-1\right\} \tag{14-4}$$

式中 a_r——杆塔某一侧可能出现的较大的高差系数$\left(\frac{h}{l}\right)$，一般山地取 $a_r=\pm0.1$～0.2。如酒杯型塔对瓶口取正值，对边线斜材或横担则取负值。

β——塔头外廓构件与水平面的夹角，当 a_r 取正值时，β 为 0°～90°之间的锐角；当 a_r 取负值时，β 取 90°～180°间的钝角。

σ、γ、φ——分别为各种运行条件下的导线应力、比载及风偏角。

l——与 a_r 相对应侧的档距（a_r 为正值时取较大的值，反之取较小值）。

b——与导线接近处的塔身构件侧面宽度的一半，m。

R——各种运行条件下的允许空气间隙，m。

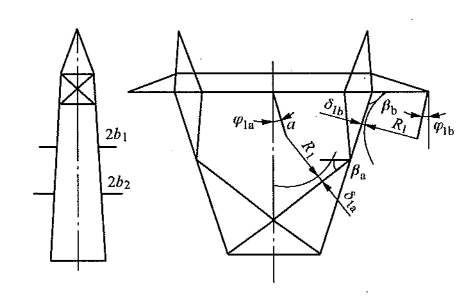


图 14-9 宽身塔最大允许摇摆角示意图

（2）根据求得的各种运行情况的最大允许摇摆角，用式（14-5）、式（14-6）相应的公式计算出水平档距与最大弧垂时垂直档距的关系，取各种运行情况中水平档距相同而相应的垂直档距最大者的包络线，即为摇摆角临界曲线，如图 14-10 所示。对杆塔的摇摆角进行检查时，可根据该杆塔实际水平档距及最大弧垂时的垂直档距（可由断面图上量得）查该曲线，如交点落在曲线上方，则安全（即表明该杆塔由于实际垂直档距大于临界值，实际摇摆角小于允许摇摆角）；交点落在曲线下方则不安全（实际摇摆角超过允许值）。

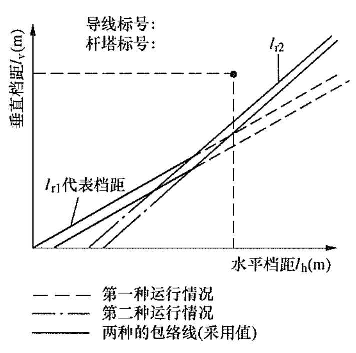


图 14-10 摇摆角临界曲线

（3）摇摆角临界曲线的计算式。

1）一般悬垂杆塔为

$$l_{vc}=\frac{\frac{W_I-G_I\tan\varphi}{2n}+\left[\left(\frac{P_cT}{T_c}-P_1\right)\tan\varphi+P_4\right]l_h}{\frac{T}{T_c}P_c\tan\varphi} \quad (14\text{-}5)$$

$$W_I=9.806\,65Av^2/16$$

式中 W_I——绝缘子串风荷载，N；

A——绝缘子串受风面积，m²；

v——该计算情况的风速，m/s；

G_I——绝缘子重力，N；

φ——绝缘子串在该计算情况下的最大允许摇摆角，（°）；

T_c、T——分别为某代表档距下导线最大弧垂时和计算情况时的张力，N；

l_h——杆塔水平档距，m；

l_{vc}——计算情况下要求的导线最大弧垂时的垂直档距，m；

P_c、P_1——导线最大弧垂时和单位自荷载，N/m；

P_4——导线计算情况时单位水平荷载，N/m；

n——每相导线根数。

2）悬垂转角杆塔为

$$l_{vc}=\frac{\frac{W_I-G_I\tan\varphi}{2n}+2T\sin\psi/2+\left[\left(\frac{P_cT}{T_c}-P_1\right)\tan\varphi+P_4\cos\psi/2\right]l_h}{\frac{T}{T_c}P_c\tan\varphi} \quad (14\text{-}6)$$

式中 ψ——线路转角，（°）。

3）悬垂换位杆塔是相当于横担方向不在转角二等分线上的悬垂转角杆塔，此时式（14-6）中之 $\sin(\psi/2)$ 应为 $\sin\left(\frac{\varphi_1-\varphi_2}{2}\right)$，$\varphi_1$、$\varphi_2$ 为换位杆（塔）两侧导线与线路中心线间的夹角。

换位杆塔数量不多，且受角度荷载的影响较大，一般宜逐基进行计算。由于换位杆塔上导线排列方式（一般为上下两层）可能与一般悬垂杆塔不同，因此换位杆塔和与之相邻的悬垂杆塔上导线的垂直档距可能与断面图上所标注的垂直档距（图上所示为下横担导线的弧垂线）不一致，故在计算或校验时应予修正。此外，因三相导线的角度荷载和垂直档距不同，应选取其中最严重的一根导线进行校验。

（4）对摇摆角超过设计值的杆塔，除调整杆（塔）位、杆（塔）型、杆（塔）高度或单联改双联外，尚应考虑加挂重锤，其具体办法如下：

在定位中查未加重锤的摇摆角临界曲线（见图 14-10），若发现某悬垂杆塔垂直档距缺少 Δl_v 时，可以加重锤予以补偿。若加重锤后，保持最大允许摇摆角仍不变（$\varphi=\varphi'$），可按式（14-7）计算所需重锤片数 N。

$$N\geqslant\frac{\frac{TP_c}{T_cP_1}\times(\Delta l_v\cdot P_c)}{G_z} \quad (14\text{-}7)$$

式中 G_z——每片重锤重力（在计算每片重力时应计入重锤座重力），N。

如果 Δl_v 很小，也可不加重锤，而将防振锤的重力计入。为补偿 Δl_v 所需的杆塔两侧的防振锤个数 N，也按式（14-7）计算，此时 G_z 为每个防振锤的重力。

此外，还有改变绝缘子串的悬挂与组装型式、缩短绝缘子串的摆动长度或限制绝缘子串的摇摆角等措施。如采用人型半耐张式或 V 型绝缘子串（V 型绝缘子串的夹角，一般应大于导线最大摇摆角的 2 倍）。当然这些并非是经常采用的措施。

（5）宽身塔及拉线杆塔的单侧允许高差系数的检查。如前所述，宽身塔及拉线杆塔的最大允许摇摆角 φ，是在某一代表性的允许单侧高差系数 $a=h/l$，用预留一定的间隙裕度 δ_r 的假定条件下做出的。因此，某一杆塔虽然实际摇摆角不超过允许值 φ（即查摇摆角临界曲线时，交点在曲线上方），但实际的单侧高差系数过大或过小而超过假定值时，导线在塔身边缘附近的间隙仍有可能不足，故一般在检查摇摆角的同时还应检查 a 是否超过允许值 a_k。如山顶上的杆塔往往实际摇摆角很小，但 a 却很大，远大于绘制最大允许摇摆角时的假定条件。这种情况下就需要根据定位后实际的 φ_x、a_x、l_x 等对这些杆塔逐基进行检查。对拉线杆塔检查方法参见第三章。对宽身塔的检查方法如下：

1）根据定位后杆塔的实际高差系数、档距等数据算出实际的摇摆角 φ_x。

2）作图并量出相应的 δ_x。

3）根据式（14-8）算出该杆（塔）所允许的 a_k，

若实际的 $a_x \leqslant a_k$ 时，则表示该塔间隙满足要求。

$$a_k \approx \frac{1}{R\cos\beta}\left[\sqrt{b^2+2R\delta_x}-b-\frac{Rlr}{2\delta}\cos(\beta-\varphi)\right] \tag{14-8}$$

式中符号意义与式（14-4）相同。

工程上为便于检验导线对铁塔窗口下缘的间隙距离，一般预先做好计算，并在定位手册中给出各型塔单侧的允许垂直档距。

（二）导线及地线的运行条件检查

在一般地区的线路，由于高差不大，通常不需检查导线及地线的运行条件（如悬挂点应力和悬垂角）。对于山区线路，由于高差较大，应检查导线与地线的悬挂点应力和悬垂角是否超过允许值。

1. 导线悬挂点应力

现行规程规定：如悬挂点高差过大，应验算悬挂点应力。悬挂点的设计安全系数不应小于 2.25。

检查悬挂点应力可以使用图 14-11 的悬挂点应力临界曲线。曲线是根据式（14-9）计算的。

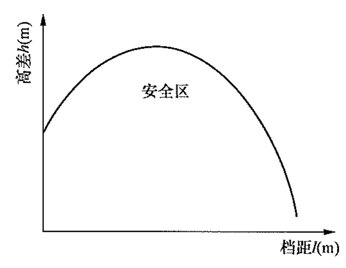


图 14-11 悬挂点应力临界曲线

$$h=\mathrm{sh}\left[\mathrm{arch}\left(\frac{\sigma_p}{\sigma_c}\right)-\frac{\gamma l}{2\sigma_c}\right]\times\frac{2\sigma_c}{\gamma}\mathrm{sh}\frac{\gamma l}{2\sigma_c} \tag{14-9}$$

式中 h——导线悬挂点之间高差，m；

σ_p——导线悬挂点允许应力，N/mm²；

l——档距，m；

σ_c——导线最低点最大使用应力，N/mm²；

γ——与 σ_c 相对应情况下的导线比载，N/(m·mm²)。

曲线的使用方法为：根据被检查档的实际悬挂点高差和档距，在曲线图上作出交点，如交点落在所用曲线的下方（安全区），表明悬挂点应力未超过允许值；否则表明超过允许值，应采取措施。

一般可采取如下措施：

（1）调整杆塔位置及高度以降低两悬挂点间的高差。

（2）降低超过允许值的杆塔所处的耐张段内的导线应力。降低程度可使用第五章导线应力放松图的通用曲线进行检查。根据被检查档的高差系数 (h/l) 和参数 C_0 交点，可从曲线中很快查得应力降低倍数 μ，进而求出降低后的最低点应力 $\sigma=\mu\sigma_c$（σ_c 为未放松前的导线最低点最大使用应力）。放松应力后的耐张段，应根据放松后的导线最低点允许应力推求最大弧垂时的应力，另选弧垂模板定位。

2. 导线悬垂角

在垂直档距较大的地方，当导线在悬垂线夹出口处的悬垂角 $\theta=\frac{1}{2}(\theta_1+\theta_2)$ 超过线夹悬垂角允许值 θ_c 时，由于附加的弯曲应力，可能使导线在线夹出口处受到损伤。显然，导线的最大悬垂角是发生在最大弧垂时，对于一般船体能自由转动的线夹两侧悬垂角，可按式（14-10）进行计算。

$$\theta_{1\cdot2}=\arctan\left(\frac{\gamma_c l_{xvc}}{\sigma_c}\right) \tag{14-10}$$

式中 $\theta_{1\cdot2}$——船体线夹两侧悬垂角（°）；

γ_c——导线最大弧垂时的比载，N/(m·mm²)；

σ_c——导线最大弧垂时的应力，N/mm²；

$l_{xvc}(x=1、2)$——杆塔两侧最大弧垂时导线最大垂直档距，m。

一般地方只要按式（14-10）即可很容易算出导线悬垂角。对于线路通过山区悬挂点高差较大时，为便于验算可按式（14-11）制成悬垂角临界曲线，如图 14-12 所示。

$$l_{1vc}=\frac{\dfrac{\sigma_c}{\gamma_c}\tan2\theta_c-l_{2vc}}{1+\dfrac{\gamma_c}{\sigma_c}\tan2\theta_c l_{2vc}} \tag{14-11}$$

式中 θ_c——线夹允许悬垂角，（°）。

在定位时，可从断面图上量得被检查杆塔两侧的垂直档距 l_{1vc}、l_{2vc}，查图 14-12 中的曲线，如交点交于曲线下方则为安全，反之为不安全。

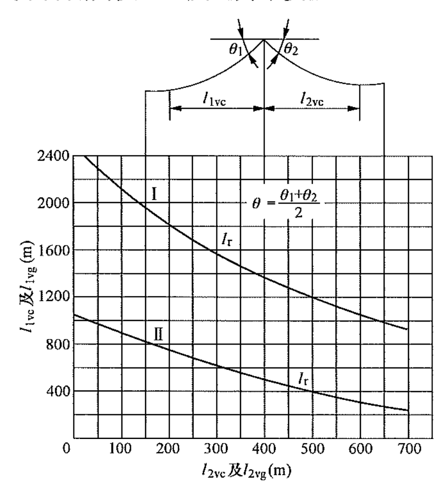


图 14-12 悬垂角临界曲线

l_r—档距（m）；Ⅰ—导线；Ⅱ—地线

当超过线夹允许悬垂角时，可采用调整杆塔位置或杆塔高度，以减少一侧或两侧的悬垂角，或改用悬垂角较大的线夹，也可以用两个悬垂线夹组合在一起悬挂。

对于地线亦可用相同的方法进行检验，可按式（14-12）进行计算。或按式（14-13）绘制曲线如图 14-12 所示。

$$\theta_g = \arctan\left(\frac{\gamma_g l_{xvg}}{\sigma_g}\right) \tag{14-12}$$

式中 σ_g ——地线最大弧垂时应力，N/mm²；

γ_g ——地线最大弧垂时比载，N/（m·mm²）；

$l_{xvg}(x=1,2)$ ——杆塔两侧最大弧垂时地线最大垂直档距，m。

$$l_{1vg} = \frac{\dfrac{\sigma_g}{\gamma_g}\tan 2\theta_g - l_{2vg}}{1+\dfrac{\gamma_g}{\sigma_g}\tan 2\theta_g l_{2vg}} \tag{14-13}$$

为了求得地线最大弧垂时的单侧垂直档距，如已知高差 h、档距 l，可根据式（14-14）直接算出。

$$l_{vg} = \frac{l}{2} + \frac{\sigma_g h}{\gamma_g l} \tag{14-14}$$

式中 h——地线悬挂点之间高差，比邻杆（塔）高为正值，反之为负值，m；

l ——档距，m。

算得地线的单侧垂直档距后，再用地线悬垂角临界曲线检查，检查方法与导线检查方法相同。

（三）绝缘子串强度检查

1. 悬垂绝缘子串强度检查

当线路通过山区时，由于地势起伏高差影响，往往垂直档距较大，可能出现导线垂直荷载超过绝缘子串的允许机械荷载的现象。为此，在定位时必须对绝缘子串的机械荷载进行验算，以 I 型悬垂绝缘子串为例，其验算如式（14-15）所示。

$$l_{vc} = \frac{T}{T_0 P_c}\left\{\left[W_{ic}^2 - \left(P_h l_h \cos\left(\frac{\psi}{2}\right) + P_{is} + 2T\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} - G_{is}\right\} + l_h\left(1 - \frac{TP_v}{T_0 P_c}\right) \tag{14-15}$$

式中 l_{vc} ——导线最大弧垂时允许垂直档距，m；

l_h ——水平档距，m；

T_0 ——一相导线最大弧垂时的张力，N；

P_c ——一相导线最大弧垂时单位荷载，N/m；

W_{ic} ——绝缘串允许机械荷载，N；

P_v、P_h ——分别为一相导线覆冰、最大风或最低气温时单位垂直荷载及水平荷载，N/m；

G_{is}、P_{is} ——分别为绝缘子串、间隔棒及防振锤覆冰时的垂直荷载及水平荷载，N；

T ——一相导线覆冰、最大风或最低气温时的张力，N；

Ψ——线路转角，（°）。

根据式（14-15）可以绘出 $l_{vc}=f(l_h)$ 的悬垂绝缘子串垂直荷载临界曲线，如图 14-13 所示。在定位时如 l_{vc} 与 l_h 交点在曲线下方，则表示满足单联绝缘子串机械强度的要求。否则，需改用双联或多联绝缘子串或改变杆（塔）位置等。

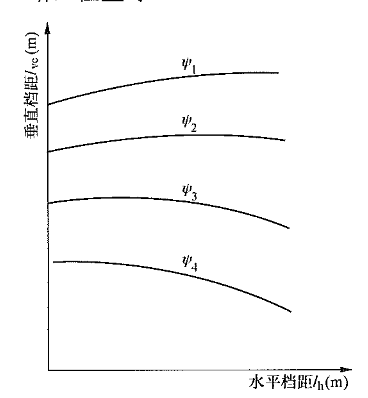


图 14-13 悬垂绝缘子串垂直荷载临界曲线

V 型绝缘子串近年来在工程中也普遍应用，其强度校验时，注意检查整串受力或单支受力情况绝缘子的机械强度。

2. 耐张绝缘子串强度检查

耐张绝缘子串的允许荷载应等于或大于导线最大悬挂点张力。导线悬挂点张力 T_m 按式（14-16）计算。

$$T_m = \sqrt{T^2 + (Pl_{vdd})^2} \tag{14-16}$$

式中 T——导线最低点张力，N；

P ——计算工况导线单位荷载，N/m；

l_{vdd}——计算工况导线的单侧垂直档距，m。

对于超过荷载的绝缘子串，可采用增加绝缘子联数或改用较高吨位的绝缘子，或放松耐张段内的导线张力。

（四）耐张绝缘子串倒挂检查

在山区，由于地形起伏较大，有些杆塔的耐张绝缘子串有可能经常上仰。这些绝缘子串如仍按正常方式悬挂，则其瓷裙向上，容易使裙槽积有雨雪、污垢，从而降低绝缘强度。为此，宜将上仰绝缘子串倒挂。可用垂直档距判断是否需要倒挂，当某侧最大弧垂时的垂直档距小于式（14-17）计算所得之垂直档距 l_{vc} 时，则该侧耐张绝缘子串需倒挂。

$$l_{vc} = -\left[\frac{G_I}{nP_{av}} + \left(\frac{T_{av}}{P_{av}} - \frac{T_c}{P_c}\right)\times\frac{h}{l}\right] \tag{14-17}$$

式中 G_I ——一相耐张绝缘子串重力，N；

P_{av} ——子导线平均温时单位荷载，N/m；
P_c ——子导线最大弧垂时单位荷载，N/m；
T_{av} ——子导线平均气温时的张力，N；
T_c ——子导线最大弧垂时的张力，N；
n ——相导线的分裂根数；
h ——该侧高差，邻塔低时为正、反之为负。

（五）施工基面及长短腿的确定

施工基面是指有坡度的塔位计算基础埋深的参考平面。施工基面根据以下原则确定：在基础上部应保证有足够的土壤体积，以满足基础受上拔力或受倾覆力矩时的稳定要求。对于一般地形的塔位受上拔力的基础，在基础边缘沿土壤上拔角 a 方向与天然地面相交（交线在图 14-14 中的投影为 b 点），通过该交线之水平面即为施工基面。

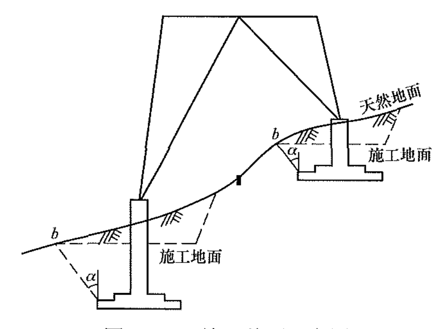


图 14-14 施工基面示意图

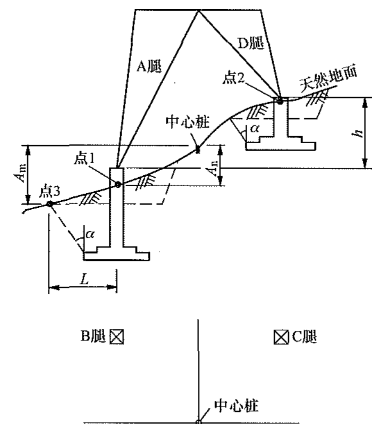
各腿施工基面与塔位中心桩之间高差，称为施工基面值。实际工程中，施工基面值应根据杆塔各腿的基础型式、上拔角、基础保护距离等因素实测确定。

施工基面及长短腿测定方法如图 14-15 所示。

点 1、点 2 分别为 A_n 及 D_n 的测点，点 3 为 A_m 的测点。在实际工程中，一般地形的 A_m 测点为 A 腿基础上拔角范围内的天然地面最低点。其他腿的测法与此相同。

在实际设计工作中，为有效地解决线路中环保问题，应根据地形地貌采用杆塔长短腿和不等高基础等措施，按开挖最小的原则，不降基或少降基以达到环保的目的。开挖后的地形地貌的恢复也是环境保护的重要内容。

现在包括特高压工程在内的众多工程都要求先测出塔基断面图和塔位地形图，然后根据实际情况进行杆塔长短腿和不等高基础的设计，如图 14-16 所示。



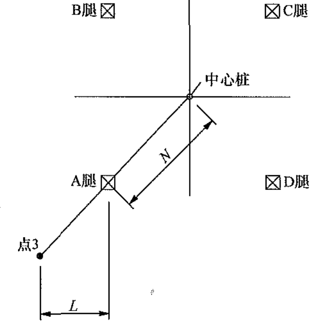


图 14-15 长短腿测定方法示意图

图中：A_n —塔位中心桩与 A 腿地面测点的高差；A_m —塔位中心桩与 A 腿施工基面的高差；N—塔位中心桩与 A 腿地面测点之间的水平距离；L—如图，按上拔角范围、基础形式、基础保护距离等因素确定；h—铁塔长短腿之间高差

（六）杆塔中心位移

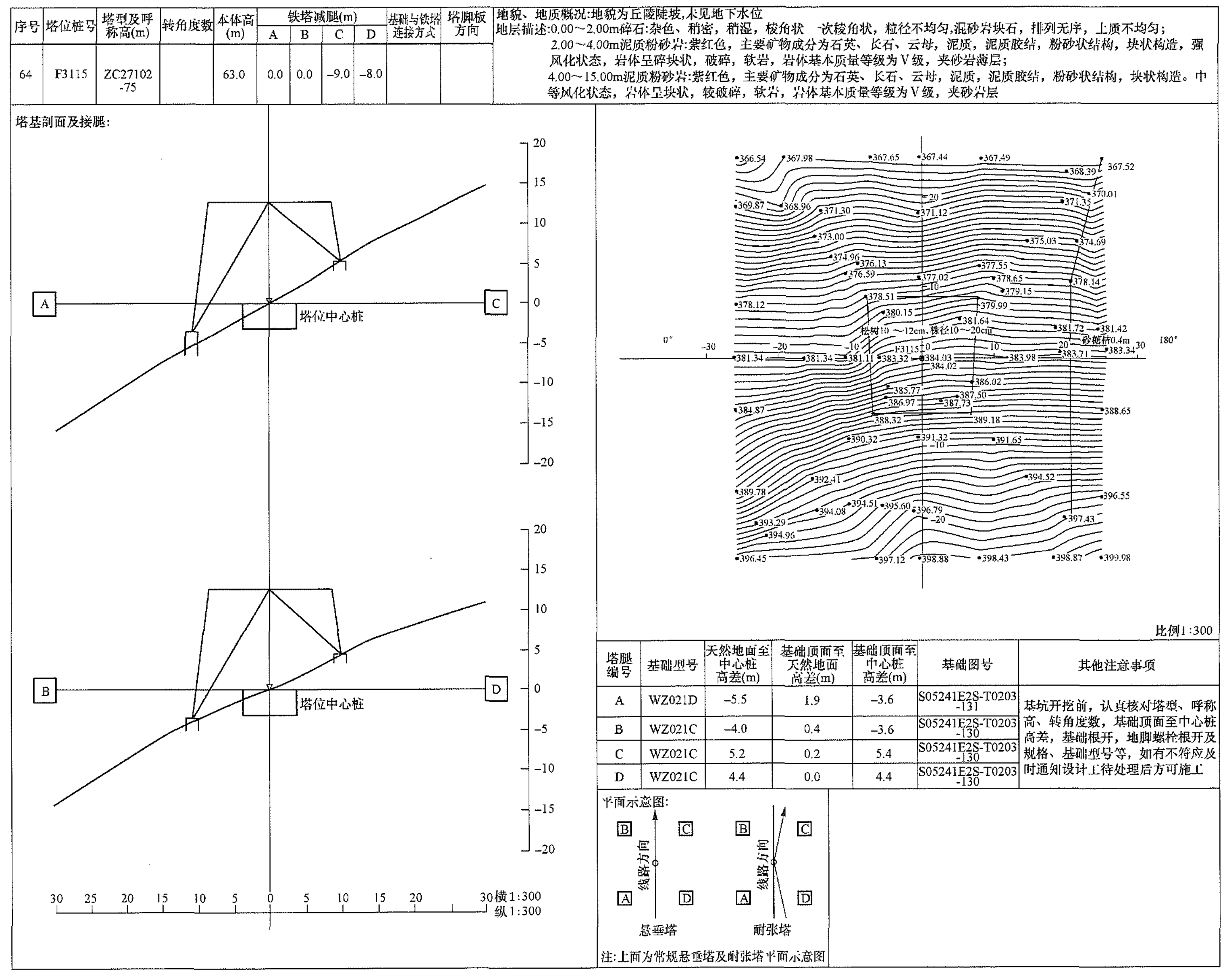
当所定杆（塔）位为转角杆塔或悬垂换位杆塔，必要时需确定杆塔实际中心与位移值。

1. 耐张转角杆塔

当耐张转角杆塔为不等长横担或横担较宽时，为尽量减少其两侧悬垂杆塔所受角度荷载的影响，杆塔中心 O 必须与线路转角中心桩 B 间有一段位移距离。如图 14-17 所示，位移距离 s 可按式（14-18）计算。

$$s = s_1 + s_2 = s_1 + \frac{b}{2}\tan\frac{\psi}{2} \tag{14-18}$$

式中 b ——横担两侧悬挂点间的宽度，m；
ψ ——线路转角度数，(°)；
s_1 ——悬挂点设计预偏距离，m；
s_2 ——横担悬挂点间宽度引起的位移，m。



序号	塔位桩号	塔型及呼称高(m)	转角度数	本体高(m)	铁塔减腿(m) A	B	C	D	基础与铁塔连接方式	塔脚板方向
64	F3115	ZC27102-75		63.0	0.0	0.0	-9.0	-8.0		

地貌、地质概况：地貌为丘陵陡坡，未见地下水位

地层描述：0.00～2.00m碎石：杂色、稍密，稍湿，棱角状 一次棱角状，粒径不均匀，泥砂岩块石，排列无序，土质不均匀；

2.00～4.00m泥质粉砂岩：紫红色，主要矿物成分为石英、长石、云母，泥质，泥质胶结，粉砂状结构，块状构造，强风化状态，岩体呈碎块状，破碎，软岩，岩体基本质量等级为Ⅴ级，夹砂岩薄层；

4.00～15.00m泥质粉砂岩：紫红色，主要矿物成分为石英、长石、云母，泥质，泥质胶结，粉砂状结构，块状构造。中等风化状态，岩体呈块状，较破碎，软岩，岩体基本质量等级为Ⅴ级，夹砂岩层

塔腿编号	基础型号	天然地面至中心桩高差(m)	基础顶面至天然地面高差(m)	基础顶面至中心桩高差(m)	基础图号	其他注意事项
A	WZ021D	-5.5	1.9	-3.6	S05241E2S-T0203-131	基坑开挖前，认真核对塔型、呼称高、转角度数，基础顶面至中心桩高差，基础根开，地脚螺栓根开及规格、基础型号等，如有不符应及时通知设计工待处理后方可施工
B	WZ021C	-4.0	0.4	-3.6	S05241E2S-T0203-130	
C	WZ021C	5.2	0.2	5.4	S05241E2S-T0203-130	
D	WZ021C	4.4	0.0	4.4	S05241E2S-T0203-130	

图 14-16 基础配置图

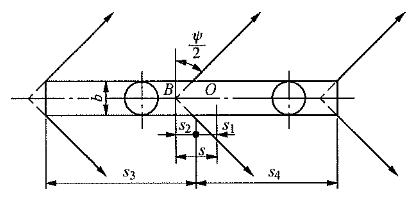


图 14-17 耐张杆塔位移图

B—线路中心桩；O—杆塔中心桩

在定位前按式（14-18）以 s、ψ分别为纵、横坐标，绘制成转角杆塔位移曲线，供定位时查用。

当三相导线的横担宽度或悬挂点预偏距离各不相同时（如 A 字或干字型耐张杆），其位移方向和数值，应以使两侧悬垂杆塔上控制相（如间隙控制）转角最小为原则进行位移，或使各相转角最小为原则作一平均位移（如各相转角方向不一时）。

2. 悬垂转角杆塔

如图 14-18 所示的悬垂转角杆塔的位移 s 可按式（14-19）确定。

$$s=\lambda\sin\left[\arctan\frac{2T_{\rm av}\sin(\psi/2)}{G_{\rm I}/2+P_1 l_{\rm h}\pm aT}\right]-s_1 \qquad (14\text{-}19)$$

式中 s_1——悬挂点向转角外侧预偏距离，m；

λ——绝缘子串长，m；

$G_{\rm I}$——绝缘子串重力，N；

$T_{\rm av}$——相导线平均气温时的张力，N；

P_1——一相导线单位自荷载，N/m；

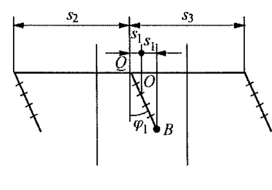
$l_{\rm h}$——水平档距，m；

ψ——线路转角，（°）；

a——高差系数，$a=\dfrac{h_1}{l_1}+\dfrac{h_2}{l_2}$；

h_1、h_2——悬挂点前、后侧高差，当被检查杆塔的悬挂点比邻塔悬挂点高时为正，比邻塔悬挂点低时则为负；

l_1、l_2——杆塔前、后侧档距，m。



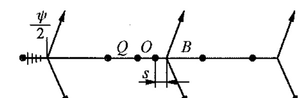


图 14-18 悬垂转角杆塔位移图

按式（14-19）计算 s 为正值时，塔位应向转角外侧位移；为负值时，应向转角内侧位移。如位移的绝对值在 0.5m 以内，则可不必位移。对需位移的塔位施工基面，应在位移后的实际塔位处施测。

3. 悬垂换位塔

当采用悬垂杆塔换位时，为了尽量减少由于导线位置变换（相当于转角）引起的悬垂杆塔及其绝缘子串上的附加水平分力，可将换位杆塔中心桩位移一段距离。位移的方向与数值应使换位杆塔及其相邻杆塔上三相导线均不致向塔身侧出现较大的水平转角为原则。

决定位移方向及大小时，最可靠的方法是根据定位后换位杆塔前后所使用的实际杆型与档距，作出如图 14-19（a）的导线平面布置图。在图中可根据各杆塔导线均不致向塔身侧出现较大的水平转角为原则，试划出换位杆塔的位移方向与距离。当不考虑换位杆塔的相邻杆塔上角度分力的大小时，如图 14-19（b）～（d）中所示的几种常用的悬垂换位型式的换位杆塔位移距离，可用图中相应的算式进行计算。但必须注意，往往相邻悬垂杆塔上的角度分力也需要调整到最小为好，故除用图中的算式计算位移距离外，还要弄清要求条件，并作位移平面图进行校验。

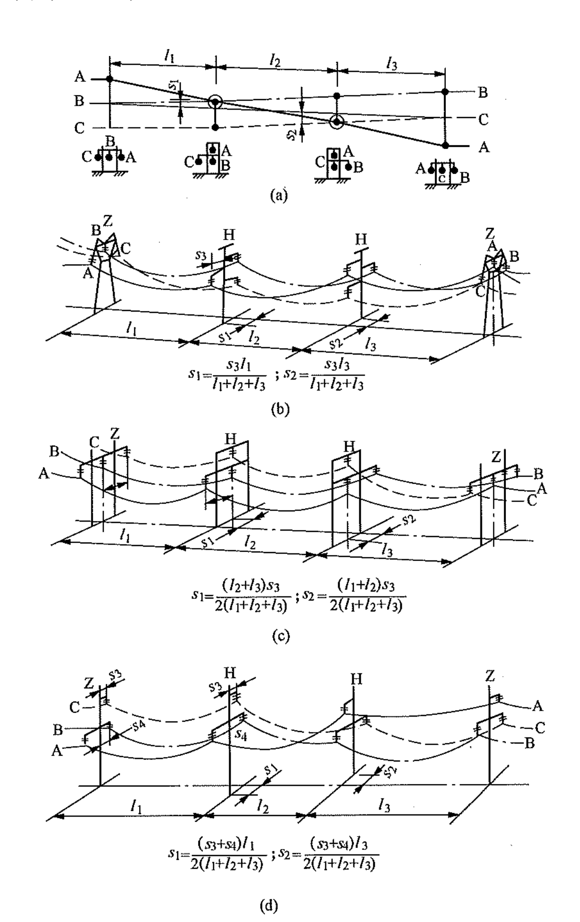


图 14-19 悬垂换位杆位移距离计算图

相邻杆塔导线排列方式改变时，档内导线间接近距离的检查详见第三章。

（七）交叉跨越距离的验算

1. 正常情况下的跨越距离验算

当线路跨越其他设施时，按照有关规程规定，导线与被跨越设施应保持一定的安全距离 s（见图 14-20），一般可从断面图上直接检查该距离。对于交直流特高压输电线路，导线弧垂受耐张串串长和串重的影响，注意校核耐张塔邻档交叉跨越距离及对地距离。

2. 邻档断线后跨越档间距的验算

如图 14-20 所示，当用悬垂杆塔跨越各种设施时，如需验算邻档断线后导线与被跨越设施间的垂直距离 s，可按式（14-20）计算。

$$s=(H_A-H_C)-f_C-(H_A-H_B)\times\frac{l_1}{l} \quad (14\text{-}20)$$

式中 f_C——交叉跨越点导线弧垂，$f_C=\frac{\gamma_1 l_1 l_2}{2\sigma}$，m；

H_A、H_B——导线悬挂点标高，m；

H_C——被跨越设施在被跨处的标高，m；

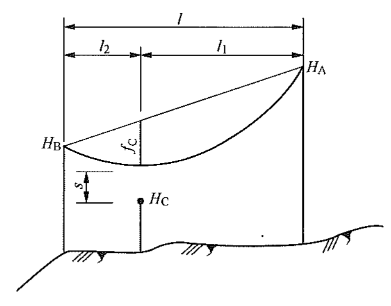


图 14-20 交叉跨越计算图

l_1、l_2——跨越处至左右杆塔的距离，m；

γ_1——导线断线后的比载，N/（m • mm²）；

σ——导线断线后的残余应力，N/mm²。

邻档断线后导线的残余应力按第五章所述方法计算。验算邻档断线时，按断线后跨越档内导线与被跨设施间的距离为最小的原则，选取断线档。对固定线夹、固定横担的情况，断线档可按表 14-1 选取。

表 14-1 断线档选取原则一览表

档距分布型式	特点	断线档选择原则
l_1 l_2 l_3 l_4 l_5 l_6	各档档距大致相等	选在档距较多的一侧断线
l_1 l_2 l_3 l_4 l_5 l_6 l_7	跨越档两侧的档距分别为一大一小，$l_3>l_5$	选在大档距内断线
l_1 l_2 l_3 l_4 l_5 l_6 l_7	跨越档两侧的档距一侧较大，一侧很小，而小档距的邻档为一大档距，$l_2>l_5>l_3$	先假定在较大档距 l_5 内断线，如计算结果裕度不大时，需再选小档距断线计算，取裕度小的情况
l_1 l_2 l_3 l_4 l_5	跨越档一侧为大档距且靠近非悬垂杆塔 $l_1>l_3$	先假定选在多档距一边，再计算大档距一边

（八）边线风偏后对地距离的检查

定位时，除满足导线对地垂直距离外，在山区尚应注意边线在风偏时对地或对树的净空距离，如图 14-21 所示。

边线风偏时对地的净空距离应按下列两种情况中较严重的检查：

（1）导线有冰，周围空气温度为-5℃，风速为 10m/s。

（2）导线无冰，最大风速及其相应温度。

被检查处的导线弧垂 f_c 可由断面图上量得，然后按式（14-21）换算。

$$f=\frac{\gamma\sigma_c f_c}{\gamma_c\sigma} \quad (14\text{-}21)$$

式中 f——检查情况下的危险点处导线弧垂，m；

f_c——定位条件下被检查处的导线弧垂，m；

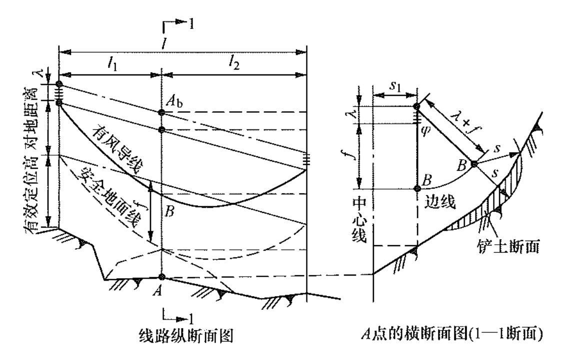


图 14-21 边线风偏后对地距离检查图

A—被检查横断面处线路中心线地面标高，m；A_b—边导线悬垂绝缘子串悬挂点连线间在 A 处的标高，m；B—对应于 A 处的边导线标高，m；f—导线在最大风偏时的弧垂，m；φ—绝缘子串和导线风偏角，(°)；λ—绝缘子串长度，m；s—导线风偏后要求的净空距离，m。

σ ——检查情况下的导线应力，N/mm^2；

σ_c ——定位条件下的导线应力，N/mm^2；

γ ——检查情况下的导线比载，$N/(m \cdot mm^2)$；

γ_c ——定位条件下的导线比载，$N/(m \cdot mm^2)$。

导线风偏后，对树、对建筑物及对地的允许距离见第二章表2-4、表2-5、表2-10和表2-11及本章表14-3。

（九）整理定位资料

定位结束后，可填写线路杆（塔）位明细表。其中接地装置型式，可按地质情况选定，参见第三章；防震锤的个数可按第五章的规定填写；输电线路相互跨越或跨越通信线路的保护措施可按第三章规定办理；绝缘子串型式及数量按工程设计要求填写，填写明细表说明详见图14-1。

第三节 有关选线和定位的规定

一、线路通过林区的要求

输电线路经过经济作物和集中林区时，宜采用加高杆塔跨越不砍通道的方案，并符合下列规定：

（1）导线与树木（考虑自然生长高度）之间的垂直距离，符合表2-8及表2-9的规定。

（2）当按砍伐通道设计时，通道净宽度不应小于线路宽度加通道附近主要树种自然生长高度的2倍。通道附近超过主要树种自然生长高度的非主要树种树木应砍伐。

（3）在最大风偏情况下输电线路通过公园、绿化区域或防护林带，导线与树木之间的最小净空距离见表2-10及表2-11。

（4）线路通过果树、经济作物林或城市灌木林不应砍伐通道，导线与果树、经济作物、城市绿化灌木及街道行道树之间的最小垂直距离，符合表2-12及表2-13。

二、线路与建筑物平行接近和交叉的要求

线路与建筑物平行接近和交叉的要求参见第二章第五节通道设计原则相关内容。

三、线路与各种工程设施交叉和接近时的基本要求

1. 有关交叉跨越的定义

（1）居民区：工业企业地区、港口、码头、火车站、城镇等人口密集区。

（2）非居民区：上述居民区以外地区，均属非居民区。虽然时常有人、车辆或农业机械到达，但未遇房屋或房屋稀少的地区，亦属非居民区。

（3）交通困难地区：车辆、农业机械不能到达的地区。

（4）通信线路：系指电报、电话、有线广播、铁道闭塞装置与信号、遥控、遥测等弱电流线路，按其重要性分三级（见附录E）。

2. 导线对地距离及交叉跨越

导线对地面、建筑物、树木、铁路、道路、河流、管道、索道及各种架空线路的距离，应根据导线最高温度或覆冰无风情况求得的最大弧垂计算垂直距离，根据最大风情况或覆冰情况求得的最大风偏进行风偏校验。

计算上述距离，可不考虑由于电流、太阳辐射等引起的弧垂增大，但应计及导线架线后塑性伸长的影响和设计、施工的误差。重冰区的线路，还应计算导线覆冰不均匀情况下的弧垂增大。

大跨越的导线弧垂应按导线实际能够达到的最高温度计算。

输电线路与高速铁路、主干铁路、高速公路及重要输电线路交叉，采用独立耐张段，交叉角不宜小于45°。

输电线路与标准轨距铁路、高速公路及一级公路交叉时，如交叉档距超过200m，最大弧垂按导线温度计算时，导线的温度应按不同要求取+70℃或+80℃计算。

（1）导线与地面的距离，在最大计算弧垂情况下，不应小于表14-2所列数值。

（2）导线与山坡、峭壁、岩石之间的净空距离在最大计算风偏情况下，不应小于表14-3所列数值。

（3）输电线路跨越弱电线路时，其交叉角应符合表14-4的要求。

表14-2 导线与地面的最小距离 s m

标称电压（kV）	线路经过地区			
	居民区	非居民区		交通困难地区
		农业耕作区	人烟稀少的非农业耕作区	
35	7	6		5
66	7	6		5
110	7	6		5
220	7.5	6.5		5.5
330	8.5	7.5		6.5
±400	—	12.0		—

续表

标称电压（kV）			线路经过地区			
			居民区	非居民区		交通困难地区
				农业耕作区	人烟稀少的非农业耕作区	
500	双回路		14	11		8.5
	单回路	水平排列		11		
		三角排列		10.5		
±500			15.5	12.0	9.5	9.0
±660			18	16	14	13.5
750			19.5	15.5	13.7	11
±800	水平V串		21	18	16	15.5
	水平I串		21.5	18.5	17	
1000	单回路		27	22	19	15
	同塔双回路（逆相序）		25	21	18	
±1100	南方		28.5	25	22	21
	北方		31.5	28	22	21

表 14-3 导线与山坡、峭壁、岩石的最小净空距离 m

线路经过地区		步行可以到达的山坡	步行不能到达的	山坡、峭壁和岩石
标称电压（kV）	35	5	3	
	66	5	3	
	110	5	3	
	220	5.5	4	
	330	6.5	5	
	±400	9	6.5	
	500	8.5	6.5	
	±500	9	6.5	
	±660	11	8.5	
	750	11	8.5	
	±800	13	11	
	1000	13	11	
	±1100	15.5	13.5	

表 14-4 输电线路与弱电线路的交叉角

弱电线路等级	一级	二级	三级
交叉角（度）	≥45	≥30	不限制

注 表中数值不包括光缆和埋地电缆。

（4）输电线路与甲类火灾危险性的生产厂房、甲类物品库房、易燃、易爆材料堆场以及可燃或易燃、易爆液（气）体贮罐的防火间距不应小于杆塔高度加3m，还应满足其他的相关规定。

（5）输电线路与铁路、公路、河流、管道、索道及各种架空线路交叉或接近，应符合表 14-5～表 14-8 的要求。

表 14-5 35～66kV 架空电力线路与铁路、公路、河流、管道、索道及各种架空线路交叉或接近的要求

项目		铁路			公路和道路	电车道（有轨及无轨）		通航河流		不通航河流		架空明线弱电线路	电力线路	特殊管道	一般管道、索道
导线或地线在跨越档接头		标准轨距：不得接头 窄轨：不限制			高速公路和一、二级公路及城市一、二级道路：不得接头 三、四级公路和城市三级道路：不限制	不得接头		不得接头		不限制		一、二级：不得接头 三级：不限制	不得接头	不得接头	不得接头
最小垂直距离（m）	线路电压	至标准轨顶	至窄轨轨顶	至承力索或接触线	至路面	至路面	至承力索或接触线	至常年高水位	至最高航行水位的最高船桅顶	至最高洪水位	冬季至冰面	至被跨越线	至被跨越线	至管道任何部分	至管道、索道任何部分
	35kV	7.5	7.5	3.0	7.0	10.0	3.0	6.0	2.0	3.0	5.0	3.0	3.0	4.0	3.0
	66kV	7.5	7.5	3.0	7.0	10.0	3.0	6.0	2.0	3.0	5.0	3.0	3.0	4.0	3.0

续表

项目		铁路		公路和道路			电车道（有轨及无轨）		通航河流	不通航河流	架空明线弱电线路		电力线路		特殊管道	一般管道、索道
最小水平距离（m）	线路电压	杆塔外缘至轨道中心		杆塔外缘至路基边缘			杆塔外缘至路基边缘		边导线至斜坡上缘（线路与拉纤小路平行）		边导线间		至被跨越线		边导线至管道、索道任何部分	
		交叉	平行	开阔地区	路径受限制地区	市区内	开阔地区	路径受限制地区			开阔地区	路径受限制地区	开阔地区	路径受限制地区	开阔地区	路径受限制地区
	35kV 66kV	30	最高杆（塔）高加3m	交叉：8.0 平行：最高杆塔高	5.0	0.5	交叉：8.0 平行：最高杆塔高	5.0	最高杆塔高		最高杆（塔）高	4.0	最高杆（塔）高	5.0	最高杆（塔）高	4.0
其他要求		不宜在铁路出站信号机以内跨越		在不受环境和规划限制的地区架空电力线路与国道的距离不宜小于20m，省道不宜小于15m，县道不宜小于10m，乡道不宜小于5m					最高洪水位时，有抗洪抢险船只航行的河流，垂直距离应协商确定		电力线路应架设在上方； 交叉点应尽量靠近杆塔，但不应小于7m（市内除外）		电压高的线路应架设在电压低线路上方； 电压相同时公用线应在专用线上方		与索道交叉，如索道在上方，索道下方应装设保护措施；交叉点不应选在管道检查井；与管道、索道平行、交叉时，管、索道应接地	

表 14-6 110～1000kV 交流架空输电线路与铁路、公路、河流、管道、索道及各种架空线路交叉或接近的要求

项目		铁路				公路	电车道（有轨及无轨）	
导线或地线在跨越档内接头		标准轨距：不得接头 窄轨：不得接头				高速公路、一级公路：不得接头 二、三、四级公路：不限制	不得接头	
邻档断线情况的检验		标准轨距：检验 窄轨：不检验				高速公路、一级公路：检验 二、三、四级公路：不检验	检验	
邻档断线情况的最小垂直距离（m）	标称电压（kV）	至轨顶			至承力索或接触线	至路面	至路面	至承力索或接触线
	110	7.0			2.0	6.0	—	2.0
最小垂直距离（m）	标称电压（kV）	至轨顶			至承力索或接触线	至路面	至路面	至承力索或接触线
		标准轨	窄轨	电气轨				
	110	7.5	7.5	11.5	3.0	7.0	10.0	3.0
	220	8.5	7.5	12.5	4.0	8.0	11.0	4.0
	330	9.5	8.5	13.5	5.0	9.0	12.0	5.0
	500	14.0	13.0	16.0	6.0	14.0	16.0	6.5
	750	19.5	18.5	21.5	7.0（10）	19.5	21.5	7（10）
	1000	27.0/25.0*			10（16）/10*（14*）	27.0/25.0*	—	—

续表

项目		铁路	公路		电车道（有轨及无轨）	
最小水平距离（m）	标称电压（kV）	杆塔外缘至轨道中心	杆塔外缘至路基边缘		杆塔外缘至路基边缘	
			开阔地区	路径受限制地区	开阔地区	路径受限制地区
	110 220 330 500 750	交叉：塔高加 3.1m，无法满足要求时可适当减小，但 110～750kV 不得小于 30m，1000kV 不得小于 40m； 平行：塔高加 3.1m，困难时双方协商确定	交叉：8m 10m（750kV） 15m 或按协议取值（1000kV）； 平行： 最高杆（塔）高	5.0 5.0 6.0 8.0（15） 10（20）	交叉：8m 10m（750kV） 平行：最高杆（塔）高	5.0 5.0 6.0 8.0 10.0
	1000			15/13 或按协议取值	—	—
附加要求		不宜在铁路出站信号机以内跨越	括号内为高速公路数值。高速公路路基边缘指公路下缘的排水沟			
备注			公路分级见附录 E，城市道路分级可参照公路的规定			

项目		通航河流		不通航河流		弱电线路		电力线路		特殊管道	索道
导线或地线在跨越档内接头		一、二级：不得接头； 三级及以下：不限制		不限制		不限制		110kV 及以上线路：不得接头； 110kV 以下线路：不限制		不得接头	不得接头
邻档断线情况的检验		不检验		不检验		Ⅰ级：检验 Ⅱ、Ⅲ级：不检验		不检验		检验	不检验
邻档断线情况的最小垂直距离（m）	标称电压（kV）	—				至被跨越物		—		至管道任何部分	—
	110	—				1.0		—		1.0	—
最小垂直距离（m）	标称电压（kV）	至五年一遇洪水位	至最高航行水位的最高船桅顶	至百年一遇洪水位	冬季至冰面	至被跨越物		至被跨越物		至管道任何部分	至索道任何部分
	110	6.0	2.0	3.0	6.0	3.0		3.0		4.0	3.0
	220	7.0	3.0	4.0	6.5	4.0		4.0		5.0	4.0
	330	8.0	4.0	5.0	7.5	5.0		5.0		6.0	5.0
	500	9.5	6.0	6.5	11（水平） 10.5（三角）	8.5		6.0（8.5）		7.5	6.5
	750	11.5	8.0	8.0	15.5	12.0		7（12）		9.5	8.5（顶部） 11（底部）
	1000	14.0/13.0*	10.0	10.0	22.0/21.0*	18.0/16.0*		10.0（16.0）		18.0/16.0*	—
最小水平距离（m）	标称电压（kV）	边导线至斜坡上缘（线路与拉纤小路平行）				与边导线间		与边导线间		边导线至管、索道任何部分	
						开阔地区	路径受限制地区	开阔地区	路径受限制地区	开阔地区	路径受限制地区（在最大风偏情况下）
	110 220 330 500 750	最高杆（塔）高				平行时：最高杆（塔）高	4.0 5.0 6.0 8.0 10.0	平行时：最高杆（塔）高	5.0 7.0 9.0 13.0 16.0	平行时：最高杆（塔）高	4.0 5.0 6.0 7.5 9.5（管道） 8.5（顶部） 11（底部）

续表

<table>
<tr><th colspan="2">项目</th><th>通航河流</th><th>不通航河流</th><th>弱电线路</th><th>电力线路</th><th>特殊管道</th><th>索道</th></tr>
<tr><td>最小水平距离（m）</td><td>1000</td><td colspan="2">河堤保护范围之外或按协议取值</td><td>13.0/12.0*</td><td>杆塔同步排列取 20m，杆塔交错排列导线最大风偏时取 13</td><td></td><td>13.0</td></tr>
<tr><td colspan="2">附加要求</td><td colspan="2">最高洪水位时，有抗洪抢险船只航行的河流，垂直距离应协商确定</td><td>输电线路应架设在上方</td><td>电压较高的线路一般架设在电压较低线路的上方，同一等级电压的电网公用线应架设在专用线上方</td><td colspan="2">1. 与索道交叉，加索道在上方，索道的下方应装保护设施；
2. 交叉点不应选在管道的检查井（孔）处；
3. 与管、索道平行、交叉时，管、索道应接地</td></tr>
<tr><td colspan="2">备注</td><td colspan="2">1. 不通航河流指不能通航，也不能浮运的河流；
2. 次要通航河流对接头不限制；
3. 并需满足航道部门协议的要求</td><td>弱电线路分级见附录 E</td><td>括号内的数值用于跨越杆（塔）顶</td><td colspan="2">1. 管、索道上的附属设施，均应视为管、索道的一部分；
2. 特殊管道指架设在地面上输送易燃、易爆物品管道</td></tr>
</table>

* 代表逆相序布置同塔双回路取值。

表 14-7　±400～±1100kV 直流架空输电线路与铁路、公路、河流、管道、索道及各种架空线路交叉最小垂直距离

项目		垂直距离（m）				
		±400	±500	±660	±800	±1100
铁路	至轨顶	16（25）	16.0	18.0	21.5	28.5*
	至承力索或接触线	7.6（8.5）	6.0（8.5）	8.0（10.5）	15.0	19.5
公路	至路面	16（2 级及以上公路） 14.5（其他公路）	16.0	18.0	21.5	28.5
通航河流	至五年一遇洪水位	12	9.0	12.5	15.0	—
	至最高航行水位桅顶	7.6	6.0	8.0	10.5	13（暂定值）
不通航河流	百年一遇洪水位	7.6	8.0	10.0	12.5	15
	冬季至冰面	12	12.0	16.0	18.5	25
弱电线	至被跨越物	8.5	8.5	14.0	17.0	22
电力线	至被跨越物（杆顶）	7.6（8.5）	6.0（8.5）	8.0（10.5）	10.5（15.0）	13（19.5）
特殊管道、索道	至管道任何部分	管道 9、索道 7.6	管道 9、索道 6	管道 14、索道 8	管道 17、索道 10.5	管道 22、索道 13

注　垂直距离中，括号内的数值用于跨杆（塔）顶。航道等级分级见附录 E。

表 14-8　±400～±1100kV 直流架空输电线路与铁路、公路、河流、管道、索道及各种架空线路水平接近距离的要求

<table>
<tr><td colspan="4" rowspan="2">项目</td><td colspan="5">最小水平距离（m）</td></tr>
<tr><td>±400</td><td>±500</td><td>±660</td><td>±800</td><td>±1100</td></tr>
<tr><td>铁路</td><td colspan="3">杆塔外缘至轨道中心</td><td>交叉：30
平行：最高塔高加 3m</td><td colspan="2">交叉：30
平行：最高塔高加 3.1m</td><td colspan="2">交叉：塔高加 3.1m，无法满足要求时可适当减小，但不得小于 40m。
平行：最高塔高加 3.1m，困难时双方协商确定</td></tr>
<tr><td rowspan="3">公路</td><td>交叉</td><td colspan="2">杆塔外缘至路基边缘</td><td>8.0</td><td>8.0 或按协议取值</td><td colspan="3">15.0 或按协议取值</td></tr>
<tr><td rowspan="2">平行</td><td rowspan="2">边导线至路基边缘</td><td>开阔地区</td><td colspan="5">最高杆（塔）高</td></tr>
<tr><td>路径受限制地区</td><td>8.0（高速公路 15.0）</td><td>8.0 或按协议取值</td><td>10.5 或按协议取值</td><td>12.0 或按协议取值</td><td>15.0 或按协议取值</td></tr>
<tr><td>通航河流</td><td colspan="3" rowspan="2">边导线至斜坡上缘（线路与拉纤小路平行）</td><td colspan="5" rowspan="2">最高杆（塔）高</td></tr>
<tr><td>不通航河流</td></tr>
<tr><td rowspan="2">弱电线</td><td colspan="2" rowspan="2">与边导线间（平行）</td><td>开阔地区</td><td colspan="5">最高杆（塔）高</td></tr>
<tr><td>路径受限制地区（最大风偏情况下）</td><td>8.0</td><td>8.0</td><td>11.0</td><td>13.0</td><td>15.5</td></tr>
<tr><td rowspan="2">电力线</td><td colspan="2" rowspan="2">与边导线间（平行）</td><td>开阔地区</td><td colspan="5">最高杆（塔）高</td></tr>
<tr><td>路径受限制地区</td><td>13.0</td><td>边导线 13，导线风偏至临塔 8.5</td><td>边导线 18，导线风偏至临塔 11</td><td>边导线 20，导线风偏至临塔 13</td><td>杆塔同步时，边导线间 22*，杆塔交错时，导线风偏至邻塔 15.5</td></tr>
<tr><td rowspan="3">特殊管道、索道</td><td rowspan="3">边导线至管、索道任何部分</td><td rowspan="2">开阔地区</td><td>交叉</td><td colspan="5">最高杆（塔）高</td></tr>
<tr><td>平行</td><td colspan="4">最高杆（塔）高</td><td>天然气、石油（非埋地管道）：最高塔高+3m</td></tr>
<tr><td colspan="2">路径受限制地区（最大风偏情况下）</td><td>9.0</td><td>9.0</td><td>13.0</td><td>风偏时 15</td><td>风偏时 17.5</td></tr>
</table>

注　1. 邻档断线情况的计算条件：+15℃，无风。
2. 路径狭窄地带，两线路杆塔位置交错排列时导线在最大风偏情况下，对相邻线路杆塔的最小水平距离，不应小于对应设计规范要求数值。
3. 跨越弱电线路或电力线路，导线截面按允许载流量选择时应校验最高允许温度时的交叉距离，其数值不得小于操作过电压间隙，且不得小于 0.8m。
4. 杆塔为固定横担，且采用分裂导线时，可不检验邻档断线时的交叉跨越垂直距离。
5. 当导、地线接头采用爆压方式时，线路跨越二级公路的跨越档内不允许有接头。
6. 重要交叉跨越确定的技术条件，需征求相关部门的意见。
7. 当线路跨越拟建铁路桥梁地段，考虑到铁路架桥机施工情况，导线至轨顶的垂直距离不应小于 30m。
8. 重覆冰地区的交叉跨越应考虑不均匀冰荷载情况校验弧垂增大，校验与被跨越物的垂直距离。
9. 对于 1000kV 交流线路，“/”前为单回路取值；“*”代表逆相序布置同塔双回路取值。
10. 表中±400kV 数值系参照“格尔木—拉萨±400kV 直流输电线路工程”取值。

附 录

附录 A 法定计量单位及单位换算

A.1 法定计量单位

法定计量单位见表 A-1～表 A-5。

表 A-1 国际单位制的基本单位

量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m
质量	千克（公斤）	kg
时间	秒	s
电流	安［培］	A
热力学温度	开［尔文］	K
物质的量	摩［尔］	mol
发光强度	坎［德拉］	cd

表 A-2 国际单位制的辅助单位

量的名称	单位名称	单位符号
平面角	弧度	rad
立体角	球面度	sr

表 A-3 国际单位制中具有专门名称的导出单位

量的名称	单位名称	单位符号	其他表示示例
频率	赫［兹］	Hz	s^{-1}
力	牛［顿］	N	$kg \cdot m/s^2$
压力，压强；应力	帕［斯卡］	Pa	N/m^2
能量；功；热	焦［耳］	J	N・m
功率；辐射通量	瓦［特］	W	J/s
电荷量	库［仑］	C	A・s
电位；电压；电动势	伏［特］	V	W/A
电容	法［拉］	F	C/V
电阻	欧［姆］	Ω	V/A
电导	西［门子］	S	A/V
磁通量	韦［伯］	Wb	V・s
磁通量密度，磁感应强度	特［斯拉］	T	Wb/m^2
电感	亨［利］	H	Wb/A
摄氏温度	摄氏度	℃	

续表

量的名称	单位名称	单位符号	其他表示示例
光通量	流［明］	lm	cd・sr
光照度	勒［克斯］	lx	lm/m^2
放射性活度	贝可［勒尔］	Bq	s^{-1}
吸收剂量	戈［瑞］	Gy	J/kg
剂量当量	希［沃特］	Sv	J/kg

表 A-4　　国家选定的非国际单位制单位

量的名称	单位名称	单位符号	换算关系和说明
时间	分 ［小］时 天（日）	min h d	1min＝60s 1h＝60min＝3600s 1d＝24h＝86400s
平面角	［角］秒 ［角］分 度	(″) (′) (°)	1″＝(π/64800)rad （π 为圆周率） 1′＝60″＝(π/10800)rad 1°＝60′＝(π/180)rad
旋转速度	转每分	r/min	$1r/min=(1/60)s^{-1}$
长度	海里	n mile	1n mile＝1852m (只用于航程)
速度	节	kn	1kn＝1n mile/h ＝(1852/3600)m/s (只用于航行)
质量	吨 原子质量单位	t u	$1t=10^3kg$ $1u\approx1.6605655\times10^{-27}kg$
体积	升	L(l)	$1L=1dm^3=10^{-3}m^3$
能	电子伏	eV	$1eV\approx1.6021892\times10^{-19}J$
级差	分贝	dB	
线密度	特［克斯］	tex	1tex＝1g/km

表 A-5　　用于构成十进倍数和分数单位的词头

所表示的因数	词头名称	词头符号
10^{18}	艾［可萨］	E
10^{15}	拍［它］	P
10^{12}	太［拉］	T
10^{9}	吉［咖］	G
10^{6}	兆	M
10^{3}	千	k
10^{2}	百	h
10^{1}	十	da
10^{-1}	分	d
10^{-2}	厘	c
10^{-3}	毫	m

续表

所表示的因数	词头名称	词头符号
10^{-6}	微	μ
10^{-9}	纳［诺］	n
10^{-12}	皮［可］	p
10^{-15}	飞［母托］	f
10^{-18}	阿［托］	a

A.2　常用物理量和法定计量单位

常用物理量和单位见表 A-6～表 A-12。

表 A-6　　力学的量和单位

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	备注
质量	m	千克（公斤） 吨	kg t	1t＝1000kg 在人民生活和贸易中，质量习惯称为重量
密度	ρ	千克每立方米 千克每升 吨每立方米	kg/m³ kg/L t/m³	1kg/L＝1000kg/m³＝1g/cm³ 1t/m³＝1000kg/m³＝1g/cm³
相对密度	d			此量无量纲。量的名称不应称为比重
比容，（比体积）	v	立方米每千克	m³/kg	
线密度	ρ_l	千克每米 特［克斯］	kg/m tex	1tex＝10^{-6}kg/m＝1g/km
面密度	ρ_A,(ρ_s)	千克每平方米	kg/m²	
动量	p	千克米每秒	kg·m/s	
动量矩，角动量	L	千克二次方米每秒	kg·m²/s	
转动惯量	I,(J)	千克二次方米	kg·m²	
力 重力 张力，拉力	F W,(P,G) F_T	牛［顿］	N	1N＝1kg·m/s²
引力常数	G	牛［顿］ 二次方米每 二次方千克	N·m²/kg²	
力矩 转矩，力偶矩	M T	牛［顿］米	N·m	
压力，压强 正应力 切应力	p,f σ,f τ,f	帕［斯卡］	Pa	1Pa＝1N/m²
功 能［量］ 势能，位能 动能	W,(A) E,(W) E_P,(V) E_k,(T)	焦［耳］ 瓦［特］［小］时 电子伏	J W·h eV	1J＝1N·m 1W·h＝3600J 1eV＝1.6021892×10^{-19}J
功率	P	瓦［特］	W	1W＝1J/s＝1N·m/s
质量流量	q_m	千克每秒 千克每分 千克每小时 吨每秒 吨每分 吨每小时	kg/s kg/min kg/h t/s t/min t/h	1kg/min＝16.6667×10^{-3}kg/s 1kg/h＝2.77778×10^{-4}kg/s 1t/s＝1000kg/s 1t/min＝16.6667kg/s 1t/h＝0.277778 kg/s

续表

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	备注
体积流量	q_V	立方米每秒 立方米每分 立方米每小时 升每秒 升每分 升每小时	m^3/s m^3/min m^3/h L/s L/min L/h	$1m^3/min=16.6667\times10^{-3}m^3/s$ $1m^3/h=2.77778\times10^{-4}m^3/s$ $1L/s=0.001m^3/s$ $1L/min=1.66667\times10^{-5}m^3/s$ $1L/h=2.77778\times10^{-7}m^3/s$
线应变 切应变，（剪应变） 体积应变	ε,e γ θ			均为无量纲量
泊松比	μ，ν			此量无量纲
弹性模量 切变模量，（剪变模量）	E G	帕［斯卡］	Pa	$1Pa=1N/m^2$
体积模量	K			
压缩系数	κ	每帕［斯卡］	Pa^{-1}	$1Pa^{-1}=1m^2/N$
截面惯性矩 极惯性矩	Ia, (I) I_p	四次方米	m^4	
截面系数	W, Z	三次方米	m^3	
摩擦系数	$\mu, (f)$			此量无量纲
［动力］粘度	$\eta, (\mu)$	帕［斯卡］秒	Pa·s	常用 mPa·s
运动粘度	ν	二次方米每秒	m^2/s	常用 mm^2·s
表面张力	γ,σ	牛［顿］每米	N/m	

表 A-7　　电学和磁学的量和单位

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	备注
电流	I	安［培］	A	在交流电技术中，用 i 表示电流的瞬时值
电荷［量］	Q,q	库［仑］ 安培小时	C A·h	1C＝1A·s 1A·h＝3600C
电荷［体］密度	$\rho,(\eta)$	库［仑］每立方米	C/m^3	
电荷面密度	σ	库［仑］每平方米	C/m^2	
电场强度	$E,(K)$	伏［特］每米	V/m	
电位，（电势）	V,φ	伏［特］	V	1V＝1W/A＝1A·Ω＝1A/S
电位差，（电势差）， 电压电动势	U E	伏［特］	V	在交流电技术中，用 u 表示电位差的瞬时值
电通［量］密度， 电位移	D	库［仑］每平方米	C/m^2	
电通［量］，电位移通量	Ψ	库［仑］	C	1C＝1A·s
电容	C	法［拉］	F	1F＝1C/V
介电常数，（电容率）	ε	法［拉］每米	F/m	
真空介电常数， （真空电容率）	ε_0	法［拉］每米	F/m	$\varepsilon_0=(8.854187818\pm0.000000071)\times10^{-12}F/m$
相对介电常数， （相对电容率）	ε_r			此量无量纲
电极化率	χ,χ_e			此量无量纲
电极化强度	P	库［仑］每平方米	C/m^2	
电偶极矩	$P,(P_e)$	库［仑］米	C·m	

续表

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	备注
电流密度	$J,l,(S,\delta)$	安［培］每平方米	A/m^2	
电流线密度	$A,(\alpha)$	安［培］每米	A/m	1A/m＝1N/Wb
磁场强度	H	安［培］每米	A/m	1A/m＝1N/Wb
磁位差，（磁势差） 磁通势，磁动势	U_m F, F_m	安［培］	A	
磁通［量］密度，磁感应强度	B	特［斯拉］	T	$1T=1Wb/m^2=1V\cdot s/m^2=1N/(A\cdot m)$
磁通［量］	Φ	韦［伯］	Wb	$1Wb=1V\cdot s=1T\cdot m^2=1A\cdot H$
磁矢位，（磁矢势）	A	韦［伯］每米	Wb/m	
自感 互感	L M,L_{12}	亨［利］	H	1H＝1Wb/A
耦合系数 漏磁系数	$k,(\kappa)$ σ			均为无量纲量
磁导率 真空磁导率	μ μ_0	亨［利］每米	H/m	$\mu_0=12.5663706144\times10^{-7}H/m$
相对磁导率	μ_r			此量无量纲
磁化率	$\kappa,(\chi_m,\chi)$			此量无量纲
［面］磁矩	m	安［培］平方米	$A\cdot m^2$	
磁化强度	M,H	安［培］每米	A/m	
磁极化强度	J,B_i	特［斯拉］	T	$1T=1Wb/m^2=1V\cdot s/m^2=1N/(A\cdot m)$
电磁能密度	w	焦［耳］每立方米	J/m^3	
坡印廷矢量	S	瓦［特］每平方米	W/m^2	
电磁波在真空中的传播速度	c,c_0	米每秒	m/s	$c=(2.99792458\pm0.000000012)\times10^8m/s$
［直流］电阻	R	欧［姆］	Ω	$1\Omega=1V/A=1S^{-1}=1W/A^2=1V^2/W$
［直流］电导	G	西［门子］	S	$1S=1A/V=1\Omega^{-1}=1A^2/W=1W/V^2$
电阻率	ρ	欧［姆］米	Ω·m	常用$\Omega\cdot mm^2/m$
电导率	γ,σ,κ	西［门子］每米	S/m	
磁阻	R_m	每亨［利］	H^{-1}	$1H^{-1}=1A/Wb$
磁导	$A,(P)$	亨［利］	H	1H＝1Wb/A
绕组的匝数 相数 极对数	N m p			均为无量纲量
相［位］差，相［位］移	φ	弧度	rad	
阻抗，（复数阻抗） 阻抗模，（阻抗） 电抗 ［交流］电阻	Z $\|Z\|$ X R	欧［姆］	Ω	$1\Omega=1V/A$ $\|Z\|=\sqrt{R^2+X^2}$
品质因数	Q			此量无量纲
导纳，（复数导纳） 导纳模，（导纳） 电纳 ［交流］电导	Y $\|Y\|$ B G	西［门子］	S	$1S=1A/V$ $\|Y\|=\sqrt{G^2+B^2}$

续表

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	备注
功率	P	瓦［特］	W	1W＝1J/s＝1N・m/s
电能［量］	W	焦［耳］ 瓦［特］小时 升	J W・h L, (1)	1J＝1N・m 1W・h＝3600J 1964 年升的新定义：1L＝1dm^3 1901 年升的定义：1L＝1.000028 dm^3
时间，时间间隔，持续时间	t	秒 分 ［小］时 天，（日）	s min h d	1min＝60s 1h＝3600s 1d＝86400s
角速度	ω	弧度每秒 弧度每分 度每秒 度每分	rad/s rad/min (°)/s (°)/min	1rad/min＝0.0166667rad/s 1°/s＝0.0174533rad/s 1°/min＝2.90888×10^{-4}rad/s
角加速度	a	弧度每二次方秒	rad/s^2	
速度	$u,v,w,$ c	米每秒 米每分 千米每小时 节	m/s m/min km/h kn	1m/min＝0.0166667m/s 1km/h＝0.277778 m/s 1kn＝0.514444 m/s
加速度	a	米每二次方秒	m/s^2	
重力加速度，自由落体加速度	g	米每二次方秒	m/s^2	标准重力加速度：g_a＝9.80665m/s^2

表 A-8　　空间的量和单位

量的名称	量的符号	单位名称	单位称号	备注
［平面］角	$\alpha, \beta, \gamma, \theta, \varphi$等	弧度 度 ［角］分 ［角］秒	rad (°) (′) (″)	此量无量纲 1°＝0.0174533rad 1′＝2.90888×10^{-4}rad 1″＝4.84814×10^{-6}rad
立体角	Ω	球面度	sr	此量无量纲
长度 宽度 高度 厚度 半径 直径 程长，距离	$l, (L)$ b,B h,H $\delta(d,t)$ r,R d,D s	米 海里	m n mile	公里为千米的俗称，符号为 km 1n mile＝1852m
面积	$A,(S)$	平方米	m^2	
体积，容积	V	立方米	m^3	

表 A-9　　声学的量和单位

量的名称	量的符号	单位名称	单位称号	备注
周期	T	秒	a	
频率	$f,(v)$	赫［兹］	Hz	1Hz＝1s^{-1}
频程				此量无量纲
角频率，圆频率	ω	每秒	s^{-1}	
波长	λ	米	m	
圆波数	k	每米	m^{-1}	

续表

量的名称	量的符号	单位名称	单位称号	备注
密度	ρ	千克每立方米	kg/m³	
静压［力］，声压	P_0,P_s,P	帕［斯卡］	Pa	1Pa＝1N/m²
质点位移	ξ，(x)	米	m	
质点速度	u	米每秒	m/s	
质点加速度	a	米每二次方秒	m/s²	
体积速度	U	立方米每秒	m³/s	
声速	c	米每秒	m/s	
声能密度	D,w	焦［耳］每立方米	J/m³	
声［源］功率 声能通量	W,p Φ	瓦［特］	W	1W＝1J/s
声强［度］	I	瓦［特］每平方米	W/m²	
声阻抗率 ［声］特性阻抗	Z_s Z_c	帕［斯卡］秒每米	Pa·s/m	
声阻抗 声阻 声抗	Z_a R_a X_a	帕［斯卡］秒每三次方案	Pa·s/m³	
声质量	M_a	千克每四次方米	kg/m⁴	
声劲	S_a	帕［斯卡］每三次方米	Pa/m³	
声顺	C_a	三次方米每帕［斯卡］	m³/Pa	
声导纳 声导 声纳	Y_a G_a B_a	三次方米每帕［斯卡］秒	m³/(Pa·s)	
力	F	牛［顿］	N	1N＝1kg·m/s²
［振动］位移	d	米	m	
［振动］速度	v	米每秒	m/s	
［振动］加速度	a	米每二次方秒	m/s²	
力阻抗 力阻 力抗	Z_m R_m X_m	牛［顿］秒每米	N·s/m	
［力］质量	M	千克	kg	
力劲	S_m	牛［顿］每米	N/m	
力顺	C_m	米每牛［顿］	m/N	
力导纳 力导 力纳	Y_m G_m B_m	米每年［顿］秒	m/(N·s)	
声压级 声强级 声功率级	L_p L_I $L_W(L_p)$	分贝	dB	均为无量纲量
阻尼系数	δ	每秒	s⁻¹	
时间常数，弛豫时间	τ	秒	s	
对数减缩率	Λ			此量无量纲

续表

量的名称	量的符号	单位名称	单位称号	备注
传播系数 衰减系数 相位系数	γ $\alpha,(\alpha)$ $\beta,(b)$	每米	m^{-1}	
损耗系数 反射系数 透射系数 吸声系数	δ r τ α			均为无量纲量
声压反射系数 声压透射系数	Y_p τ_p			均为无量纲量
孔隙率	q			此量无量纲
流阻	R_f	帕［斯卡］秒每米	Pa·s/m	
衰变常数	k	每秒	s^{-1}	
衰变率	K	分贝每秒	dB/s	
混响时间	$T,(T_{60})$	秒	s	
隔声量，传声损失	R	分贝	dB	此量无量纲
吸声量	A	平方米	m^2	
响度级	L_N			此量无量纲
自由场［电压］灵敏度	M	伏［特］每帕［斯卡］	V/Pa	

表 A-10　　周期及有关现象的量和单位

量的名称	量的符号	单位名称	单位称号	备注
周期	T	秒 分 ［小］时 天，（日）	s min h d	1min＝60s 1h＝3600s 1d＝86400s
时间常数	$\tau,(T)$	秒	s	
频率	$f,(\nu)$	赫［兹］ 每秒	Hz s^{-1}	$1s^{-1}=1Hz$
转速，旋转频率	n	转每分 转每秒	r/min r/s	1r/min＝0.10472rad/s 1r/s＝6.28319rad/s
角频率，圆频率	ω	弧度每秒 每秒	rad/s s^{-1}	
波长	λ	米	m	
波数 圆波数，角波数	σ k	每米 弧度每米	m^{-1} rad/m	
振幅级差，场级差	L_F	分贝	dB	此量无量纲
功率级差	L_p	分贝	dB	此量无量纲
阻尼系数	δ	每秒 分贝每秒	s^{-1} dB/s	
对数减缩率	Λ	分贝	dB	此量无量纲
衰减系数 相位系数 传播系数	α β γ	每米	m^{-1}	

表 A-11　　光及有关电磁辐射的量和单位

量的名称	量的符号	单位名称	单位称号	备注
频率	f,ν	赫［兹］	Hz	$1Hz=1s^{-1}$
圆频率，角频率	ω	每秒 弧度每秒	a^{-1} rad/s	
波长	λ	米	m	
波数、波率 圆波数，圆波率	σ k	每米	m^{-1}	
电磁波在真空中的传播速度	c,c_0	米每秒	m/s	$c=(2.99792458\pm0.000000012)\times10^8m/s$
辐［射］能	$Q,W,(U,Q_e)$	焦［耳］	J	$1J=1N\cdot m=1kg\cdot m^2/s^2$
辐［射］能密度	$w,(u)$	焦［耳］每立方米	J/m^3	
辐［射］能密度的光谱密集度，光谱辐［射］能密度	w_λ	焦［耳］每四次方米	J/m^4	
辐［射］功率，辐［射能］通量	$P,\Phi,(\Phi_e)$	瓦［特］	W	$1W=1J/s$

表 A-12　　热 学 的 量 和 单 位

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	备注
热力学温度	T,Θ	开［尔文］	K	
摄氏温度	t,θ	摄氏度	℃	1℃=1K $t=\left(\frac{T}{K}-273.15\right)$℃
线［膨］胀系数 体［膨］胀系数 相对压力系数	a_l ∂_V,γ a_p	每开［尔文］ 每摄氏度	K^{-1} $℃^{-1}$	$1℃^{-1}=1K^{-1}$
压力系数	β	帕［斯卡］每开［尔文］ 帕［斯卡］每摄氏度	Pa/K Pa/℃	1Pa/℃=1Pa/K
压缩率	κ	每帕［斯卡］	Pa^{-1}	$1Pa^{-1}=1m^2/N$
热，热量	Q	焦［耳］	J	$1J=1N\cdot m$
热流量	Φ	瓦［特］	W	$1W=1J/s$
热流［量］密度	q,φ	瓦［特］每平方米	W/m^2	
热导率，（导热系数）	λ,k	瓦［特］每米开［尔文］ 瓦［特］每米摄氏度	W/(m·K) W/(m·℃)	1W/(m·℃)=1W/(m·K)
比内能 比焓	$u,(e)$ $h,(i)$	焦［耳］ 每千克	J/kg	
比亥姆霍兹自由能，比亥姆霍兹函数 比吉市斯自由能，比吉布斯函数	a,f g	焦［耳］每千克	J/kg	
马休函数	J	焦［耳］每开［尔文］	J/K	1J/℃=1J/K
普朗克函数	Y	焦［耳］每开［尔文］	J/℃	1J/℃=1J/K

A.3 惯用的非法定计量单位与法定计量单位的换算

惯用的非法定计量单位与法定计量单位的换算见表 A-13～表 A-20。

表 A-13 惯用的非法定计量单位与法定计量单位换算系数

量的名称及符号	法定单位名称及符号	惯用的非法定单位		换算系数
		名称	符号	
长度 L，l	米 m 海里 nmile	英寸 英尺 码 英里 埃	in ft yd mile Å	1in＝2.54×10^{-2}m 1ft＝0.3048m 1yd＝0.9144m 1mile＝1609.34m 1Å＝10^{-10}m
面积 A，（S）	平方米 m^2 公顷 hm^2 平方千米 km^2	平方英寸 平方英尺 平方码 平方英里 公亩 公顷 亩	in^2 ft^2 yd^2 $mile^2$ a ha 亩	$1in^2=6.4516\times10^{-4}m^2$ $1ft^2=9.29030\times10^{-2}m^2$ $1yd^2=0.836127\ m^2$ $1mile^2=2.58999\times10^6m^2$ $1a=10^2m^2$ $1ha=1hm^2=10^4m^2$ 1 亩＝$6.6667\times10^2m^2$
体积 V	立方米 m^3 升 L，（l）	立方英寸 立方英尺 立方码	in^3 ft^3 yd^3	$1in^3=1.63871\times10^{-5}m^3$ $1ft^3=2.83168\times10^{-2}m^3$ $1yd^3=0.764555\ m^3$
热力学温度 T，Θ	开［尔文］ K	兰氏度 华氏度 度	°R ℉ deg	$t_R(°R)=\frac{9}{5}T(K)$ $t_R(℉)=\frac{9}{5}T(K)-459.67$ 1deg＝1K
摄氏温度 t,θ	摄氏度 ℃			
速度 u,v w,c	米每秒 m/s 节 kn	英尺每秒 码每秒 英里每时 英节	ft/s yd/s mile/h kn(UK)	1ft/s＝0.3048m/s 1yd/s＝0.9144m/s 1mile/h＝1.60934km/h 1kn(UK)＝0.51477m/s
加速度 a 重力加速度 g	米每二次方秒 m/s^2	英尺每二次方秒 码每二次方秒 伽	ft/s^2 yd/s^2 Gal	$1ft/s^2=0.3048m/s^2$ $1yd/s^2=0.9144m/s^2$ $1Gal=0.01m/s^2$
［动力］ 粘度 $\eta,(\mu)$	帕［斯卡］ 秒 Pa·s	泊 里泊 千克力秒每平方米	P cP $kgf\cdot s/m^2$	1P＝0.1Pa·s 1cP＝0.001Pa·s $1kgf\cdot s/m^2=9.80665Pa\cdot s$
运动粘度 ν	二次方米每秒 m^2/s	二次方英尺每秒 二次方码每秒 恩氏粘度 斯托克斯 厘斯托克斯	ft^2/s yd^2/s °E St cSt	$1ft^2/s=9.29030m^2/s$ $1yd^2/s=0.836127\ m^2/s$ $1°E=10^{-6}m^2/s$ $1St=10^{-4}m^2/s$ $1cSt=10^{-6}m^2/s$
质量 m	千克 kg 克 g 吨 t	盎司 克拉 磅 英担 美担 英吨 美吨	oz carat lb long cwt sh cwt ton ton(US)	1oz＝28.3495g 1carat＝0.2g 1lb＝0.453592 kg 1long cwt＝50.8023kg 1sh cwt＝45.3592kg 1ton＝1016.05kg 1ton(US)＝907.185kg
密度 ρ	千克每立方米 kg/m^3 吨每立方米 t/m^3	磅每立方英尺 磅每立方英寸 英吨每立方码 美吨每立方码	lb/ft^3 lb/in^3 ton/yd^3 $ton(US)/yd^3$	$1lb/ft^3=16.0185kg/m^3$ $1lb/in^3=27.6799t/m^3$ $1ton/yd^3=1.32894t/m^3$ $1ton(US)/yd^3=1.18655t/m^3$

续表

量的名称及符号	法定单位名称及符号	惯用的非法定单位		换算系数
		名称	符号	
线密度 ρ_l	千克每米 kg/m	磅每英寸 磅每英尺 磅每码 英吨每千码 英吨每英里	lb/in lb/ft lb/yd ton/1000yd ton/mile	1lb/in＝17.8580kg/m 1lb/ft＝1.48816kg/m 1lb/yd＝0.496055 kg/m 1ton/1000yd＝1.11116kg/m 1ton/mile＝0.631342 kg/m
面密度 $\rho_A(\rho_s)$	千克每平方米 kg/m^2	磅每平方英尺 盎司每平方英尺 磅每英亩 千克每公顷	lb/ft^2 oz/ft^2 lb/acre kg/ha	$1lb/ft^2＝4.88243kg/m^2$ $1oz/ft^2＝0.305152\ kg/m^2$ $1lb/acre＝1.12085\times10^{-4}kg/m^2$ $1kg/ha＝1\times10^{-4}kg/m^2$
转动惯量 I，(J)	千克二次方米 $kg\cdot m^2$	磅二次方英尺 磅二次方英寸 盎司二次方英寸	$lb\cdot ft^2$ $lb\cdot in^2$ $oz\cdot in^2$	$1lb\cdot ft^2＝4.21401\times10^{-2}kg/m^2$ $1lb\cdot in^2＝2.92640\times10^{-4}kg/m^2$ $1oz\cdot in^2＝1.8290\times10^{-5}kg/m^2$
力 F 重力 W，(P,G)	牛［顿］ N	千克力 吨力 达因 磅力 英吨力 美吨力	kgf tf dyn lbf tonf ton(US)f	1kgf＝9.80665N $1tf＝9.80665\times10^3N$ $1dyn＝10^{-5}N$ 1lbf＝4.44822N $1tonf＝9.96402\times10^3N$ $1ton(US)f＝8.89644\times10^3N$
力矩 M 转矩 力偶矩 T	牛［顿］米 $N\cdot m$	千克力米 吨力米 达因厘米 磅力英寸 磅力英尺 英吨力英尺	$kgf\cdot m$ $tf\cdot m$ $dyn\cdot cm$ $lbf\cdot in$ $lbf\cdot ft$ $tonf\cdot ft$	$1kgf\cdot m＝9.80665N\cdot m$ $1tf\cdot m＝9.80665\times10^3N\cdot m$ $1dyn\cdot cm＝10^{-7}N\cdot m$ $1lbf\cdot in＝0.112985\ N\cdot m$ $1lbf\cdot ft＝1.35582N\cdot m$ $1tonf\cdot ft＝3.03703\times10^3N\cdot m$
压力，压强 P	帕［斯卡］ Pa	千克力每平方米 千克力每平方厘米 吨力每平方米 巴 工程大气压 标准大气压 托 米水柱 毫米汞柱	kgf/m^2 kgf/cm^2 tf/m^2 bar at atm Torr mH_2O mmHg	$1kgf/m^2＝9.80665Pa$ $1kgf/cm^2＝9.80665\times10^4Pa$ $1tf/m^2＝9.80665\times10^3Pa$ $1bar＝10^5Pa$ $1at＝9.80665\times10^4Pa$ $1atm＝1.013250\ \times10^5Pa$ $1Torr＝1.333224\ \times10^2Pa$ $1mH_2O＝9.80665\times10^3Pa$ $1mmHg＝1.333224\ \times10^2Pa$
功 W，(A) 能［量］ E，(W) 热，热量 Q	焦［耳］ J 千瓦［特］ ［小］时 $kW\cdot h$	尔格 千克力米 磅力英尺 英热单位 马力小时 英制马力小时 升工程大气压 升标准大气压 卡	erg $kgf\cdot m$ $lbf\cdot ft$ Btu 马力・时 $HP\cdot h$ $L\cdot at$ $L\cdot atm$ cal	$1erg＝10^{-7}J$ $1kgf\cdot m＝9.80665J$ $1lbf\cdot ft＝1.35582J$ $1Btu＝1.05506\times10^3J$ 1 马力・时＝2.6478×10^6J $1HP\cdot h＝2.6845\times10^6J$ $1L\cdot at＝98.0665J$ $1L\cdot atm＝101.325J$ 1cal＝4.1868J
功率 P	瓦［特］ W	千克力米每秒 ［米制］马力 英制马力 千卡每小时	$kfg\cdot m/s$ 马力 HP，hp kcal/h	$1kfg\cdot m/s＝9.80665W$ 1 马力＝735.499W 1HP＝745.70W 1kcal/h＝1.163W
比热容 c 比熵 s	焦［耳］每千克开［尔文］ J/（$kg\cdot K$）	千卡每千克开尔文 热化学千卡每千克开尔文 千克力米每千克开尔文	$kcal_{IT}/(kg\cdot K)$ $kcal_{th}/(kg\cdot K)$ $kgf\cdot m/(kg\cdot K)$	$1kcal_{IT}/(kg\cdot K)＝4.1868\times10^3J/(kg\cdot K)$ $1kcal_{th}/(kg\cdot K)＝4.1840\times10^3J/(kg\cdot K)$ $1kgf\cdot m/(kg\cdot K)＝9.80665J/(kg\cdot K)$

续表

量的名称及符号	法定单位名称及符号	惯用的非法定单位		换算系数
		名称	符号	
比内能 $u,(e)$ 比焓 $h,(i)$	焦［耳］每千克 J/kg	千卡每千克 热化学千卡每千克 千克力米每千克	$kcal_{IT}$/kg $kcal_{th}$/kg kgf・m/kg	1$kcal_{IT}$/kg＝4.1868×10^3J/kg 1$kcal_{th}$/kg＝4.1840×10^3J/kg 1kgf・m/kg＝9.80665J/kg
传热系数 h,a ［总］传热系数 k,K	瓦［特］每平方米开［尔文］ W/（m^2・K）	卡每平方厘米秒开尔文 千卡每平方米小时开尔文	cal_{IT}/(cm^2・s・K) $kcal_{IT}$/(m^2・h・K)	1cal_{IT}/(cm^2・s・K)＝4.1868×10^4W/（m^2・K） 1$kcal_{IT}$/(cm^2・h・K)＝1.163W/（m^2・K）
质量流量 q_m	千克每秒 kg/s 吨每［小］时 t/h	磅每秒 英吨每小时 美吨每小时	lb/s ton/h ton(US)/h	1lb/s＝0.453592 kg/s 1ton/h＝1.01605t/h 1ton(US)/h＝0.907185 t/h
体积能量 q_V	立方米每秒 m^3/s 立方米每［小］时 m^3/s 升每秒 L/s	立方英寸每秒 立方英尺每秒 立方码每秒 英加仑每秒 美加仑每秒	in^3/s ft^3/s yd^3/s gal(UK)/s gal(UK)/s	1in^3/s＝16.3871mL/s 1ft^3/s＝28.3186L/s 1yd^3/s＝0.764555 m^3/s 1gal(UK)/s＝4.54609L/s 1gal(UK)/s＝3.78541L/s
磁通［量］ Φ	韦［伯］ Wb	麦克斯韦	Mx	1Ms ≙ 10^{-8}Wb
磁通［量］密度 磁感应强度 B	特［斯拉］ T	高斯	Gs	1Gs ≙ 10^{-4}T
磁场强度 H	安［培］每米 A/m	奥斯特	Oe	1Oe ≙ 79.5775A/m
磁位差 U_m 磁通势 F，F_m	安［培］ A	吉伯	Gb	1Gb ≙ 0.795775 A

注 1. ［ ］内的字，是在不致混淆的情况下，可以省略的字。去掉［ ］内的字，即为单位名称的简称，如力矩单位名称为牛［顿］米，其简称为牛米；磁场强度单位名称为安［培］每米，其简称为安每米。

2. 单位的中文符号必须使用单位简称，如压力单位的中文符号为帕，不能用帕斯卡；磁场强度单位的中文符号为安/米，不能用安培/米。无单位简称时，可用单位全称作为单位中文符号，如质量单位名称为千克，其中文符号也是千克。

表 A-14　长度单位换算

公里	市里	英里	海里	米	市尺	英尺	码	厘米	市寸	英寸
1	2	0.6214	0.5400	1	3	3.2808	1.0936	1	0.3000	0.3937
0.5000	1	0.3107	0.2700	0.333	1	1.0936	0.3645	3.3333	1	1.3123
1.6093	3.2187	1	0.8689	0.3048	0.9144	1	0.3333	2.5400	0.7620	1
1.8520	3.7040	1.1508	1	0.9144	2.7432	3	1	—	—	—

表 A-15　英寸和毫米换算

英寸	习惯称呼	毫米	英寸	习惯称呼	毫米	英寸	习惯称呼	毫米	英寸	习惯称呼	毫米
1/16	半分	1.5875	5/16	二分半	7.9375	9/16	四分半	14.2875	3/16	六分半	20.6375
1/8	一分	3.1750	3/8	三分	9.5250	5/8	五分	15.8750	7/8	七分	22.2250
3/16	一分半	4.7625	7/16	三分半	11.1125	11/16	五分半	17.4625	15/16	七分半	23.8125
1/4	二分	6.3500	1/2	四分	12.7000	3/4	六分	19.0500	1	一英寸	25.4000

表 A-16 面 积 单 位 换 算

平方千米	公顷	市亩	英亩	平方英里	平方米	平方市尺	平方英尺	平方码	平方厘米	平方市寸	平方英寸
1	100.00	1500.00	247.12	0.3861	1	9.0000	10.7643	1.1960	1	0.0900	0.1550
0.0100	1	15.00	2.4712	0.0039	0.1111	1	1.1960	0.1329	11.111	1	1.7222
0.0007	0.0667	1	0.1647	0.0003	0.0929	0.8361	1	0.1111	6.4516	0.5806	1
0.0040	0.4047	6.0716	1	0.0016	0.8361	7.5251	9.0000	1	—	—	—
2.5900	259.00	3885.0	640.00	1	—	—	—	—	—	—	—

表 A-17 单位长度的质量换算

克/厘米	盎司/英寸	千克/米	磅/英尺	磅/码
1	0.0897	0.1000	0.0672	0.2016
11.1483	1	1.1148	0.7492	2.2475
10.0000	0.8966	1	0.6720	2.0159
14.8820	1.3348	1.4882	1	3
4.9605	0.4449	0.4961	0.3333	1

表 A-18 单 位 体 积 质 量 换 算

千克/米^3	磅/英尺^3	吨/米^3	英吨/英尺^3	千克/升	磅/英加仑
1	0.0624	0.001	0.00003	0.001	0.0100
16.0184	1	0.016	0.0005	0.016	0.1647
1000	62.5001	1	0.0300	1	10.0313
33333.33	2083.333	33.3333	1	33.3333	334.376
100.7800	6.2344	0.0997	0.0030	0.0997	1

表 A-19 应 力 单 位 换 算

千克/厘米^2	磅/英寸^2	磅/英尺^2	吨/米^2	英吨/英尺^2
1	14.2234	198.72	10	0.9143
0.0703	1	144	0.7031	0.0643
0.0005	0.0069	1	0.0049	0.0004
0.1000	1.4222	204.8032	1	0.0914
1.0937	15.5546	2240	10.9366	1

表 A-20 长度、面积、质量、容量进位和换算

	长度			面积			质量			容量		
	名称	代号	换算	名称	代号	换算	名称	代号	换算	名称	代号	换算
公制	微米	μ	1/1000000 米	毫米^2	mm^2	1/1000000 米^2	毫克	mg	1/1000000 千克	毫升	mL	1/1000 升
	忽米	cmm	1/100000 米	厘米^2	cm^2	1/10000 米^2	厘克	cg	1/100000 千克	厘升	cL	1/100 升
	丝米	dmm	1/10000 米	米^2	m^2		分克	dg	1/10000 千克	分升	dL	1/10 升
	毫米	mm	1/1000 米	公亩	a	100 米^2	克	g	1/1000 千克	升	L	
	厘米	cm	1/100 米	公顷	ha	10000 米^2	十克	dag	1/100 千克	十升	daL	10 升
	分米	dm	1/10 米				百克	hg	1/10 千克	百升	hL	100 升
	米	m					千克	kg		千升	kL	1000 升

续表

	长度			面积			质量			容量		
	名称	代号	换算	名称	代号	换算	名称	代号	换算	名称	代号	换算
公制	十米	dam	10 米				公担	q	100 千克			
	百米	hm	100 米				吨	t	1000 千克			
	千米	km	1000 米									
市制	市毫		1/10000 市尺	市寸 ^{2}		1/100 市尺 ^{2}	市厘		1/10000 市斤	市合		1/100 市斗
	市厘		1/1000 市尺	市尺 ^{2}			市分		1/1000 市斤	市升		1/10 市斗
	市分		1/100 市尺	市丈 ^{2}		100 市尺 ^{2}	市钱		1/100 市斤	市斗		
	市寸		1/10 市尺	市分		600 市尺 ^{2}	市两		1/10 市斤	市石		10 市斗
	市尺			市亩		6000 市尺 ^{2}	市斤					
	市丈		10 市尺				市担		100 市斤			
	市里		1500 市尺									
英制	英分		1/8 英寸	英寸 ^{2}	in^2	1/144 英尺 ^{2}	盎司	oz	1/16 磅	及耳	gi	1/32 加仑
	英丝		1/1000 英寸	英尺 ^{2}	ft^2		磅	lb		品脱	pt	1/8 加仑
	英寸	in	1/12 英尺	码 ^{2}	yd^2	9 英尺 ^{2}	英吨	T	2240 磅	夸脱	qt	1/4 加仑
	英尺	ft		英亩	A	43560 英尺 ^{2}				加仑	gal	277.42 英寸 ^{3}
	码	yd	3 英尺							立方		
	英里	mi	1760 码							英寸		

注　英制的英寸和英尺也可用符号（″）和（′）代替，加在数字右上角。

附录B　导 线 和 地 线

B.1　钢芯铝绞线

B.1.1　钢芯铝绞线结构排列见图 B-1。

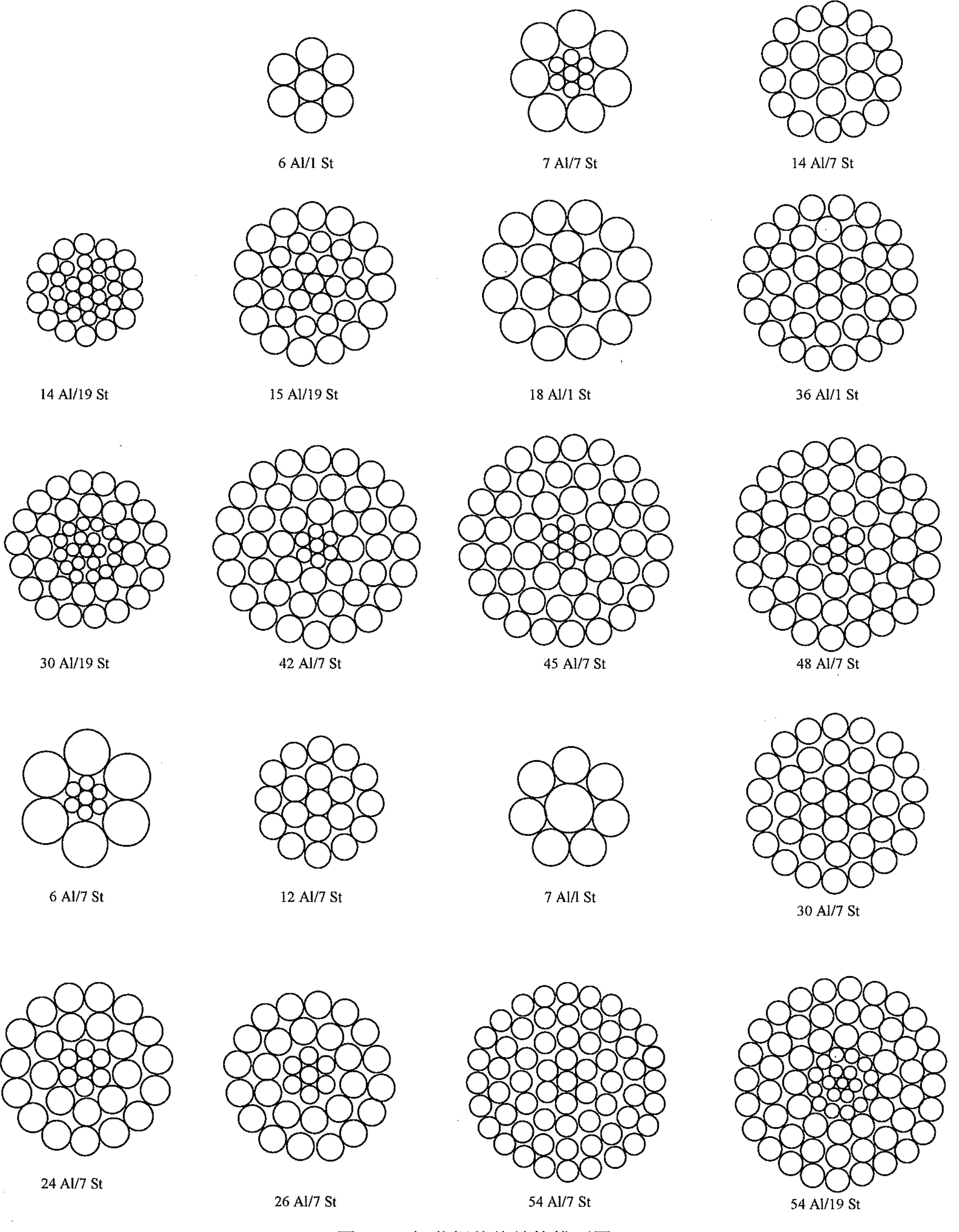


图 B-1　钢芯铝绞线结构排列图

B.1.2 钢芯铝绞线标准见表 B-1，摘自 GB/T 1179—2017。

表 B-1 钢芯铝绞线规格

标称截面铝/钢	钢比(%)	计算面积(mm^2)			单线根数 n		单线直径(mm)		直径(mm)		单位长度质量(kg/km)	额定拉断力/kN						20℃直流电阻(Ω/km)			
												JL，JL1			JL2，JL3						
		铝	钢	总和	铝	钢	铝	钢	钢芯	绞线		G1A	G2A	G3A	G1A	G2A	G3A	L	L1	L2	L3
10/2	16.7	10.6	1.78	12.4	6	1	1.50	1.50	1.50	4.50	42.8	4.14	4.38	4.63	3.87	4.12	4.36	2.7062	2.6842	2.6625	2.6413
16/3	16.7	16.1	2.69	18.8	6	1	1.85	1.85	1.85	5.55	65.2	6.13	6.51	6.88	5.89	6.26	6.64	1.7791	1.7646	1.7504	1.7364
25/4	16.7	24.9	4.15	29.1	6	1	2.30	2.30	2.30	6.90	100.7	9.10	9.68	10.22	8.97	9.56	10.10	1.1510	1.1417	1.1325	1.1234
35/6	16.7	34.9	5.81	40.7	6	1	2.72	2.72	2.72	8.16	140.9	12.55	13.36	14.12	12.55	13.36	14.12	0.8230	0.8163	0.8097	0.8033
40/6	16.7	39.9	6.65	46.6	6	1	2.91	2.91	2.91	8.73	161.2	14.37	15.30	16.16	14.37	15.30	16.16	0.7190	0.7132	0.7074	0.7018
50/8	16.7	48.3	8.04	56.3	6	1	3.20	3.20	3.20	9.60	195.0	16.81	17.93	19.06	16.81	17.93	19.06	0.5946	0.5898	0.5850	0.5804
50/30	58.3	50.7	29.6	80.3	12	7	2.32	2.32	6.96	11.6	371.3	42.61	46.75	50.60	42.61	46.75	50.60	0.5693	0.5646	0.5601	0.5556
65/10	16.7	63.1	10.5	73.6	6	1	3.66	3.66	3.66	11.0	255.1	21.67	22.41	24.20	21.67	22.41	24.20	0.4546	0.4509	0.4472	0.4436
70/10	16.7	68.0	11.3	79.3	6	1	3.80	3.80	3.80	11.4	275.0	23.36	24.16	26.08	23.36	24.16	26.08	0.4217	0.4182	0.4149	0.4116
70/40	58.3	69.7	40.7	110	12	7	2.72	2.72	8.16	13.6	510.4	58.22	63.92	69.21	58.22	63.92	69.21	0.4141	0.4108	0.4075	0.4042
95/15	16.2	94.4	15.3	110	26	7	2.15	1.67	5.01	13.6	380.5	34.93	37.08	39.22	33.99	36.13	38.28	0.3059	0.3034	0.3010	0.2986
95/20	19.8	95.1	18.8	114	7	7	4.16	1.85	5.55	13.9	408.5	37.24	39.87	42.51	37.24	39.87	42.51	0.3020	0.2996	0.2972	0.2948
95/55	58.3	96.5	56.3	153	12	7	3.20	3.20	9.60	16.0	706.4	77.85	85.73	93.61	77.85	85.73	93.61	0.2992	0.2968	0.2944	0.2920
100/17	16.7	100	16.7	117	6	1	4.61	4.61	4.61	13.8	404.7	34.38	35.55	38.39	34.38	35.55	38.39	0.2865	0.2842	0.2819	0.2796
120/7	5.6	119	6.6	125	18	1	2.90	2.90	2.90	14.5	378.9	27.74	28.67	29.53	27.74	28.67	29.53	0.2422	0.2403	0.2383	0.2364
120/20	16.3	116	18.8	134	26	7	2.38	1.85	5.55	15.1	466.4	42.26	44.89	47.53	41.68	44.31	46.95	0.2496	0.2476	0.2456	0.2436
120/25	19.8	122	24.2	147	7	7	4.72	2.10	6.30	15.7	526.0	47.96	51.36	54.75	47.96	51.36	54.75	0.2346	0.2327	0.2308	0.2290
120/70	58.3	122	71.3	193	12	7	3.60	3.60	10.8	18.0	894.0	97.92	102.9	115.0	97.92	102.9	115.0	0.2364	0.2345	0.2326	0.2307
125/7	5.6	125	6.93	132	18	1	2.97	2.97	2.97	14.9	397.4	29.10	30.07	30.97	29.10	30.07	30.97	0.2310	0.2291	0.2272	0.2254
125/20	16.3	125	20.3	145	26	7	2.47	1.92	5.76	15.6	502.4	45.51	48.35	51.19	44.89	47.73	50.57	0.2318	0.2299	0.2280	0.2262

标称截面铝/钢	钢比(%)	计算面积(mm^2)			单线根数 n		单线直径(mm)		直径(mm)		单位长度质量(kg/km)	额定拉断力/kN JL，JL1，JL2，JL3			20℃直流电阻(Ω/km)			
		铝	钢	总和	铝	钢	铝	钢	钢芯	绞线		G1A	G2A	G3A	L	L1	L2	L3
150/8	5.6	145	8.04	153	18	1	3.20	3.20	3.20	16.0	461.3	32.73	33.86	34.98	0.1990	0.1973	0.1957	0.1942
150/20	12.9	146	18.8	164	24	7	2.78	1.85	5.55	16.7	549.0	46.78	49.41	52.05	0.1981	0.1964	0.1949	0.1933
150/25	16.3	149	24.2	173	26	7	2.70	2.10	6.30	17.1	600.5	53.67	57.07	60.46	0.1940	0.1924	0.1908	0.1893
150/35	23.3	147	34.4	182	30	7	2.50	2.50	7.50	17.5	675.4	64.94	69.75	74.22	0.1962	0.1946	0.1930	01915
160/9	5.6	160	8.87	168	18	1	3.36	3.36	3.36	16.8	508.6	36.09	37.33	38.57	0.1805	0.1790	0.1775	0.1761
185/10	5.6	183	10.2	193	18	1	3.60	3.60	3.60	18.0	583.8	40.51	41.22	42.95	0.1572	0.1559	0.1547	0.1534
185/25	13.0	187	24.2	211	24	7	3.15	2.10	6.30	18.9	705.5	59.23	62.62	66.02	0.1543	0.1530	0.1518	0.1506
185/30	16.3	181	29.6	211	26	7	2.98	2.32	6.96	18.9	732.0	64.56	68.70	77.55	0.1592	0.1579	0.1567	0.1554
185/45	23.3	185	43.1	228	30	7	2.80	2.80	8.40	19.6	847.2	80.54	86.57	92.18	0.1564	0.1551	0.1539	0.1527
200/11	5.6	200	11.1	211	18	1	3.76	3.76	3.76	18.8	636.9	44.19	44.97	46.86	0.1441	0.1429	0.1418	0.1406
210/10	5.6	204	11.3	215	18	1	3.80	3.80	3.80	19.0	650.5	45.14	45.93	47.86	0.1411	0.1399	0.1388	0.1377
210/25	13.0	209	27.1	236	24	7	3.33	2.22	6.66	20.0	788.4	66.19	69.98	73.78	0.1380	0.1369	0.1358	0.1347
210/35	16.2	212	34.4	246	26	7	3.22	2.50	7.50	20.4	853.1	74.11	78.92	83.38	0.1364	0.1353	0.1342	0.1331
210/50	23.3	209	48.8	258	30	7	2.98	2.98	8.94	20.9	959.7	91.23	98.06	104.4	0.1381	0.1370	0.1359	0.1348
240/30	13.0	244	31.7	276	24	7	3.60	2.40	7.20	21.6	921.5	75.19	79.62	83.74	0.1181	0.1171	0.1162	0.1153
240/40	16.3	239	38.9	278	26	7	3.42	2.66	7.98	21.7	963.5	83.76	89.20	94.26	0.1209	0.1199	0.1189	0.1180
240/55	23.3	241	56.3	298	30	7	3.20	3.20	9.60	22.4	1106.6	101.7	109.6	117.5	0.1198	0.1188	0.1178	0.1169
250/25	9.8	250	24.5	274	22	7	3.80	2.11	6.33	21.5	879.4	68.56	71.99	75.41	0.1156	0.1147	0.1137	0.1128
250/40	16.3	250	40.7	291	26	7	3.50	2.72	8.16	22.2	1008.6	87.64	93.34	98.63	0.1154	0.1145	0.1136	0.1127
300/15	5.2	297	15.3	312	42	7	3.00	1.67	5.01	23.0	940.2	68.41	70.56	72.70	0.0973	0.0965	0.0958	0.0950

续表

标称截面铝/钢	钢比（%）	计算面积（mm²）			单线根数 n		单线直径（mm）		直径（mm）		单位长度质量（kg/km）	额定拉断力/kN JL，JL1，JL2，JL3			20℃直流电阻（Ω/km）			
		铝	钢	总和	铝	钢	铝	钢	钢芯	绞线		G1A	G2A	G3A	L	L1	L2	L3
300/20	6.2	303	18.8	322	45	7	2.93	1.95	5.85	23.4	1001.8	76.04	78.97	81.89	0.0952	0.0945	0.0937	0.0929
300/25	8.8	306	27.1	333	48	7	2.85	2.22	6.66	23.8	1057.9	83.76	87.55	91.34	0.0944	0.0936	0.0928	0.0921
300/40	13.0	300	38.9	339	24	7	3.99	2.66	7.98	23.9	1132.0	92.36	97.81	102.9	0.0961	0.0954	0.0946	0.0938
300/50	16.3	300	48.8	348	26	7	3.83	2.98	8.94	24.3	1208.6	103.6	110.4	116.8	0.0964	0.0956	0.0948	0.0941
300/70	23.3	305	71.3	377	30	7	3.60	3.60	10.8	25.2	1400.6	127.2	132.2	144.3	0.0946	0.0939	0.0931	0.0924
315/22	6.9	316	21.8	358	45	7	2.99	1.99	5.97	23.9	1043.2	79.19	82.24	85.28	0.0914	0.0907	0.0900	0.0893
400/20	5.1	406	20.9	427	42	7	3.51	1.95	5.85	26.9	1286.3	89.48	92.41	95.34	0.0711	0.0705	0.0700	0.0694
400/25	6.9	392	27.1	419	45	7	3.33	2.22	6.66	26.6	1294.7	96.37	100.2	104.0	0.0737	0.0731	0.0725	0.0720
400/35	8.8	391	34.4	425	48	7	3.22	2.50	7.50	26.8	1348.6	103.7	108.5	112.9	0.0739	0.0733	0.0727	0.0721
400/50	13.0	400	51.8	452	54	7	3.07	3.07	9.21	27.6	1510.5	123.0	130.2	137.5	0.0724	0.0718	0.0712	0.0706
400/65	16.3	399	65.1	464	26	7	4.42	3.44	10.3	28.0	1610.0	135.4	144.5	153.6	0.0724	0.0718	0.0712	0.0706
400/95	22.9	408	93.3	501	30	19	4.16	2.50	12.5	29.1	1857.9	171.6	184.6	196.7	0.0709	0.0703	0.0697	0.0692
450/30	6.9	450	31.1	482	45	7	3.57	2.38	7.14	28.6	1488.0	107.6	111.9	116.0	0.0641	0.0636	0.0631	0.0626
450/60	13.0	451	58.4	509	54	7	3.26	3.26	9.78	29.3	1703.2	138.6	146.8	155.0	0.0642	0.0636	0.0631	0.0626
500/35	6.9	500	34.6	534	45	7	3.76	2.51	7.53	30.1	1651.3	119.4	124.3	128.8	0.0578	0.0574	0.0569	0.0564
500/45	8.8	489	43.1	532	48	7	3.60	2.80	8.40	30.0	1687.0	127.3	133.3	138.9	0.0591	0.0587	0.0582	0.0577
500/65	13.0	499	64.7	564	54	7	3.43	3.43	10.3	30.9	1885.5	153.5	162.5	171.6	0.0580	0.0575	0.0570	0.0566
560/40	6.9	560	38.6	598	45	7	3.98	2.65	7.95	31.8	1848.7	133.6	139.0	144.0	0.0516	0.0512	0.0508	0.0504
560/70	12.7	559	70.9	630	54	19	3.63	2.18	10.9	32.7	2101.8	172.4	182.3	192.2	0.0518	0.0513	0.0509	0.0505
630/45	6.9	629	43.4	673	45	7	4.22	2.81	8.43	33.8	2078.4	150.2	156.3	161.9	0.0459	0.0455	0.0452	0.0448
630/55	8.8	640	56.3	696	48	7	4.12	3.20	9.60	34.3	2208.3	164.3	172.2	180.1	0.0452	0.0448	0.0444	0.0441
630/80	12.7	629	79.6	708	54	19	3.85	2.31	11.6	34.7	2363.1	191.4	202.5	212.9	0.0460	0.0456	0.0453	0.0449
710/50	6.9	709	49.2	758	45	7	4.48	2.99	8.97	35.9	2344.2	169.5	176.4	182.8	0.0407	0.0404	0.0401	0.0398
710/90	12.6	709	89.6	799	54	19	4.09	2.45	12.3	36.8	2664.6	215.6	228.2	239.8	0.0408	0.0404	0.0401	0.0398
720/50	6.9	725	50.1	775	45	7	4.53	3.02	9.06	36.2	2395.9	171.2	178.2	185.2	0.0398	0.0395	0.0392	0.0389
800/35	4.3	799	34.6	834	72	7	3.76	2.51	7.53	37.6	2481.7	159.0	163.6	167.9	0.0362	0.0359	0.0356	0.0353
800/55	6.9	814	56.3	871	45	7	4.80	3.20	9.60	38.4	2690.0	192.2	200.1	208.0	0.0355	0.0352	0.0349	0.0346
800/65	8.3	799	66.6	866	84	7	3.48	3.48	10.4	38.3	2731.7	194.8	203.7	212.5	0.0362	0.0359	0.0356	0.0354
800/70	8.8	808	71.3	879	48	7	4.63	3.60	10.8	38.6	2790.1	207.7	212.7	224.8	0.0358	0.0355	0.0352	0.0349
800/100	12.7	799	102	901	54	19	4.34	2.61	13.1	39.1	3006.6	243.7	257.9	271.1	0.0362	0.0359	0.0356	0.0353
900/40	4.3	900	38.9	939	72	7	3.99	2.66	7.98	39.9	2793.8	179.0	184.1	188.9	0.0321	0.0319	0.0316	0.0314
900/75	8.3	898	74.9	973	84	7	3.69	3.69	11.1	40.6	3071.3	214.8	219.7	231.8	0.0322	0.0320	0.0317	0.0314
1000/45	4.3	1002	43.1	1045	72	7	4.21	2.80	8.40	42.1	3108.8	199.0	204.8	210.1	0.0289	0.0286	0.0284	0.0282
1000/80	8.1	1003	81.7	1085	84	19	3.90	2.34	11.7	42.9	3418.0	241.0	251.9	262.0	0.0288	0.0286	0.0284	0.0282
1120/50	4.2	1120	47.3	1167	72	19	4.45	1.78	8.90	44.5	3467.7	222.8	229.1	235.3	0.0258	0.0256	0.0254	0.0252
1120/90	8.1	1120	91.0	1211	84	19	4.12	2.47	12.4	45.3	3813.4	268.8	280.9	292.2	0.0258	0.0256	0.0254	0.0252
1250/70	5.6	1252	70.1	1322	76	7	4.58	3.57	10.7	47.4	4011.1	263.5	268.2	279.5	0.0231	0.0229	0.0227	0.0225
1250/100	8.1	1248	102	1350	84	19	4.35	2.61	13.1	47.9	4252.3	299.8	313.4	325.9	0.0232	0.0230	0.0228	0.0226
1400/135	9.6	1400	134	1534	88	19	4.50	3.00	15.0	51.0	4926.4	358.2	376.0	392.6	0.0207	0.0205	0.0203	0.0202
1440/120	8.1	1439	117	1556	84	19	4.67	2.80	14.0	51.4	4899.7	345.4	361.0	375.4	0.0201	0.0200	0.0198	0.0196

B.2 铝绞线

铝绞线标准见表 B-2，摘自 GB/T 1179—2017。

表 B-2 JL 铝绞线规格

标称截面铝	计算面积（mm^2）	单线根数 n	直径		单位长度质量（kg/km）	额定拉断力（kN）	20℃直流电阻（Ω/km）
			单线（mm）	绞线（mm）			
10	10.0	7	1.35	4.05	27.4	1.95	2.8578
16	16.1	7	1.71	5.13	44.0	3.05	1.7812
25	24.9	7	2.13	6.39	68.3	4.49	1.1480
35	34.4	7	2.50	7.50	94.1	6.01	0.8333
40	40.1	7	2.70	8.10	109.8	6.81	0.7144
50	49.5	7	3.00	9.00	135.5	8.41	0.5787
63	63.2	7	3.39	10.2	173.0	10.42	0.4532
70	71.3	7	3.60	10.8	195.1	11.40	0.4019
95	95.1	7	4.16	12.5	260.5	15.22	0.3010
100	100	19	2.59	13.0	275.4	17.02	0.2874
120	121	19	2.85	14.3	333.5	20.61	0.2374
125	125	19	2.89	14.5	343.0	21.19	0.2309
150	148	19	3.15	15.8	407.4	24.43	0.1943
160	160	19	3.27	16.4	439.1	26.33	0.1803
185	183	19	3.50	17.5	503.0	30.16	0.1574
200	200	19	3.66	18.3	550.0	31.98	0.1439
210	210	19	3.75	18.8	577.4	33.58	0.1371
240	239	19	4.00	20.0	657.0	38.20	0.1205
250	250	19	4.09	20.5	686.9	39.94	0.1153
300	298	37	3.20	22.4	820.7	49.10	0.0969
315	315	37	3.29	23.0	867.6	51.90	0.0917
400	400	37	3.71	26.0	1103.2	64.00	0.0721
450	451	37	3.94	27.6	1244.2	72.18	0.0639
500	503	37	4.16	29.1	1387.1	80.46	0.0573
560	560	37	4.39	30.7	1544.7	89.61	0.0515
630	631	61	3.63	32.7	1743.8	101.0	0.0458
710	710	61	3.85	34.7	1961.5	113.6	0.0407
800	801	61	4.09	36.8	2213.7	128.2	0.0360
900	898	61	4.33	39.0	2481.1	143.7	0.0322
1000	1001	61	4.57	41.1	2763.8	160.1	0.0289
1120	1121	91	3.96	43.6	3099.2	170.4	0.0258
1250	1249	91	4.18	46.0	3453.1	189.8	0.0232
1400	1403	91	4.43	48.7	3878.5	213.2	0.0206
1500	1499	91	4.58	50.4	4145.6	227.9	0.0193

B.3 铝合金绞线

铝合金绞线标准见表 B-3、表 B-4，摘自 GB/T 1179—2017。

表 B-3　　JLHA1、JLHA2 铝合金绞线规格

标称截面	计算面积（mm^2）	单线根数 n	直径（mm）		单位长度质量（kg/km）	额定拉断力（kN）		20℃直流电阻（Ω/km）	
			单线	绞线		JLHA1	JLHA2	JLHA1	JLHA2
16	16.1	7	1.71	5.13	44.0	5.22	4.74	2.0695	2.0500
20	18.4	7	1.83	5.49	50.4	5.98	5.43	1.8070	1.7900
25	24.9	7	2.13	6.39	68.3	8.11	7.36	1.3339	1.3213
30	28.8	7	2.29	6.87	79.0	9.37	8.51	1.1540	1.1431
35	34.9	7	2.52	7.56	95.6	11.35	10.30	0.9529	0.9439
45	45.9	7	2.89	8.67	125.7	14.92	13.55	0.7246	0.7177
50	50.1	7	3.02	9.06	137.3	16.30	14.79	0.6635	0.6573
70	70.1	7	3.57	10.7	191.9	22.07	20.67	0.4748	0.4703
75	72.4	7	3.63	10.9	198.4	22.82	21.37	0.4593	0.4549
95	95.1	7	4.16	12.5	260.5	29.97	28.07	0.3497	0.3464
120	115	19	2.78	13.9	317.3	37.48	34.02	0.2899	0.2871
145	143	19	3.10	15.5	394.6	46.61	42.30	0.2331	0.2309
150	150	19	3.17	15.9	412.6	48.74	44.24	0.2229	0.2208
185	184	19	3.51	17.6	505.9	57.91	54.24	0.1818	0.1801
210	210	19	3.75	18.8	577.4	66.10	61.91	0.1593	0.1578
230	230	19	3.93	19.7	634.2	72.60	67.99	0.1451	0.1437
240	240	19	4.01	20.1	660.3	75.59	70.79	0.1393	0.1380
300	299	37	3.21	22.5	825.9	97.32	88.33	0.1119	0.1109
360	362	37	3.53	24.7	998.8	114.1	106.8	0.0925	0.0917
400	400	37	3.71	26.0	1103.2	126.0	118.0	0.0838	0.0830
465	460	37	3.98	27.9	1269.6	145.0	135.8	0.0728	0.0721
500	500	37	4.15	29.1	1380.4	157.7	147.6	0.0670	0.0663
520	518	37	4.22	29.5	1427.4	163.0	152.7	0.0648	0.0641
580	575	37	4.45	31.2	1587.2	181.3	169.8	0.0582	0.0577
630	631	61	3.63	32.7	1743.8	198.9	186.2	0.0532	0.0527
650	645	61	3.67	33.0	1782.4	203.3	190.4	0.0520	0.0515
720	725	61	3.89	35.0	2002.5	228.4	213.9	0.0463	0.0459
800	801	61	4.09	36.8	2213.7	252.5	236.4	0.0419	0.0415
825	817	61	4.13	37.2	2257.2	257.4	241.1	0.0411	0.0407
930	919	61	4.38	39.4	2538.8	289.5	271.1	0.0365	0.0362
1000	1001	61	4.57	41.1	2763.8	315.2	295.2	0.0335	0.0332
1050	1037	91	3.81	41.9	2868.8	310.5	290.8	0.0324	0.0321
1150	1161	91	4.03	44.3	3209.7	347.4	325.3	0.0289	0.0287
1300	1291	91	4.25	46.8	3569.7	386.3	361.8	0.0260	0.0258
1450	1441	91	4.49	49.4	3984.2	431.2	403.8	0.0233	0.0231

表 B-4　　JLHA3、JLHA4 铝合金绞线规格

标称截面	计算面积（mm^2）	单线根数 n	直径（mm）		单位长度质量（kg/km）	额定拉断力（kN）		20℃直流电阻（Ω/km）	
			单线	绞线		JLHA3	JLHA4	JLHA3	JLHA4
25	24.9	7	2.13	6.39	68.3	6.24	7.23	1.1971	1.2285
35	34.4	7	2.50	7.50	94.1	8.59	9.96	0.8689	0.8918
40	40.1	7	2.70	8.10	109.8	10.02	11.62	0.7450	0.7646
50	49.5	7	3.00	9.00	135.5	11.88	13.61	0.6034	0.6193
70	71.3	7	3.60	10.8	195.1	17.10	18.88	0.4191	0.4301
95	95.1	7	4.16	12.5	260.5	21.88	24.26	0.3138	0.3221
100	100	19	2.59	13.0	275.4	25.03	29.03	0.2997	0.3076
120	121	19	2.85	14.3	333.5	30.30	35.15	0.2475	0.2540
125	125	19	2.89	14.5	343.0	31.16	36.14	0.2407	0.2471
150	148	19	3.15	15.8	407.4	35.54	40.72	0.2026	0.2080
185	183	19	3.50	17.5	503.0	43.87	48.44	0.1641	0.1684
200	200	19	3.66	18.3	550.0	47.98	52.97	0.1501	0.1540
210	210	19	3.75	18.8	577.4	50.36	55.61	0.1430	0.1467
240	239	19	4.00	20.0	657.0	54.92	60.88	0.1257	0.1290
250	250	19	4.09	20.5	686.9	57.41	63.65	0.1202	0.1234
275	276	37	3.08	21.6	760.3	66.16	75.81	0.1091	0.1120
280	279	37	3.10	21.7	770.2	67.02	76.80	0.1077	0.1105
300	298	37	3.20	22.4	820.7	71.42	81.83	0.1011	0.1037
315	315	37	3.29	23.0	867.6	75.49	86.50	0.0956	0.0981
335	336	37	3.40	23.8	926.5	80.62	92.38	0.0895	0.0919
340	340	37	3.42	23.9	937.5	81.57	93.47	0.0885	0.0908
400	400	37	3.71	26.0	1103.2	96.00	106.0	0.0752	0.0772
425	426	37	3.83	26.8	1175.7	102.3	113.0	0.0705	0.0724
450	451	37	3.94	27.6	1244.2	108.3	119.5	0.0667	0.0684
500	503	37	4.16	29.1	1387.1	115.7	128.2	0.0598	0.0614
530	531	61	3.33	30.0	1467.4	127.5	146.1	0.0567	0.0582
560	560	37	4.39	30.7	1544.7	128.8	142.8	0.0537	0.0551
630	631	61	3.63	32.7	1743.8	151.5	167.3	0.0477	0.0490
675	674	61	3.75	33.8	1861.0	161.7	178.5	0.0447	0.0459
710	710	61	3.85	34.7	1961.5	170.4	188.2	0.0424	0.0435
775	774	91	3.29	36.2	2139.2	176.4	202.1	0.0390	0.0400
800	801	61	4.09	36.8	2213.7	184.3	204.4	0.0376	0.0386
870	871	91	3.49	38.4	2407.2	198.5	227.4	0.0346	0.0355
900	898	61	4.33	39.0	2481.1	206.6	229.1	0.0335	0.0344
940	937	91	3.62	39.8	2589.8	213.5	235.8	0.0332	0.0330
975	973	91	3.69	40.6	2691.0	221.9	245.0	0.0310	0.0318
1000	1001	61	4.57	41.1	2763.8	230.1	255.1	0.0301	0.0309
1080	1082	91	3.89	42.8	2990.6	246.6	272.3	0.0279	0.0286
1120	1121	91	3.96	43.6	3099.2	255.5	282.2	0.0269	0.0276
1215	1213	91	4.12	45.3	3354.7	265.1	293.9	0.0249	0.0255
1250	1249	91	4.18	46.0	3453.1	272.9	302.5	0.0241	0.0248
1350	1352	91	4.35	47.9	3739.7	295.5	327.6	0.0223	0.0229
1400	1403	91	4.43	48.7	3878.5	306.5	339.8	0.0215	0.0221
1500	1499	91	4.58	50.4	4145.6	327.6	363.2	0.0201	0.0206
1645	1647	91	4.80	52.8	4553.4	359.8	398.9	0.0183	0.0188

B.4 钢芯铝合金绞线

钢芯铝合金绞线标准见表 B-5、表 B-6，摘自 GB/T 1179—2017。

表 B-5 JLHA1/G1A、JLHA1/G2A、JLHA1/G3A 和 JLHA2/G1A、JLHA2/G2A、JLHA2/G3A 钢芯铝合金绞线规格

标称截面铝合金/钢	钢比（%）	计算面积（mm²）			单线根数 n		单线直径		直径（mm）		单位长度质量（kg/km）	额定拉断力（kN）						20℃直流电阻（Ω/km）	
		铝合金	钢	总和	铝合金	钢	铝合金	钢	钢芯	绞线		JLHA1/G1A	JLHA1/G2A	JLHA1/G3A	JLHA2/G1A	JLHA2/G2A	JLHA2/G3A	JLHA1	JLHA2
10/2	16.7	10.6	1.78	12.4	6	1	1.50	1.50	1.50	4.50	42.8	5.51	5.76	6.01	5.20	5.44	5.69	3.1444	3.1147
16/3	16.7	16.1	2.69	18.8	6	1	1.85	1.85	1.85	5.55	65.2	8.39	8.76	9.14	7.90	8.28	8.66	2.0671	2.0476
35/6	16.7	34.9	5.81	40.7	6	1	2.72	2.72	2.72	8.16	140.9	17.96	18.77	19.52	16.91	17.72	18.48	0.9563	0.9472
50/8	16.7	48.3	8.04	56.3	6	1	3.20	3.20	3.20	9.60	195.0	24.53	25.66	26.78	23.08	24.21	25.33	0.6909	0.6844
50/30	58.3	50.7	29.6	80.3	12	7	2.32	2.32	6.96	11.6	371.3	50.22	54.36	58.21	48.70	52.84	56.69	0.6614	0.6552
70/10	16.7	68.0	11.3	79.3	6	1	3.80	3.80	3.80	11.4	275.0	33.91	34.70	36.63	32.55	33.34	35.27	0.4899	0.4853
70/40	58.3	69.7	40.7	110	12	7	2.72	2.72	8.16	13.6	510.4	69.03	74.73	80.01	66.94	72.63	77.92	0.4812	0.4766
95/15	16.2	94.4	15.3	110	26	7	2.15	1.67	5.01	13.6	380.5	48.62	50.76	52.91	45.79	47.93	50.08	0.3554	0.3521
95/20	19.8	95.1	18.8	114	7	7	4.16	1.85	5.55	13.9	4085	51.98	54.62	57.25	50.08	52.72	55.35	0.3509	0.3476
95/55	58.3	96.5	56.3	153	12	7	3.20	3.20	9.60	16.0	706.4	93.29	101.2	109.1	90.40	98.3	106.2	0.3477	0.3444
120/7	5.6	119	6.61	125	18	1	2.90	2.90	2.90	14.5	378.9	46.17	47.10	47.95	42.60	43.53	44.39	0.2815	0.2788
120/20	16.3	116	18.8	134	26	7	2.38	1.85	5.55	15.1	466.4	59.61	62.24	64.88	56.14	58.77	61.41	0.2900	0.2873
120/25	19.8	122	24.2	147	7	7	4.72	2.10	6.30	15.7	526.0	66.95	70.34	73.74	64.50	67.89	71.29	0.2726	0.2700
120/70	58.3	122	71.3	193	12	7	3.60	3.60	10.8	18.0	894.0	116.9	121.8	134.0	114.4	119.4	131.5	0.2747	0.2721
150/8	5.6	145	8.04	153	18	1	3.20	3.20	3.20	16.0	461.3	55.90	57.02	58.15	51.55	52.68	53.80	0.2312	0.2290
150/20	12.9	146	18.8	164	24	7	2.78	1.85	5.55	16.7	549.0	69.36	71.99	74.63	64.99	67.62	70.26	0.2301	0.2279
150/25	16.3	149	24.2	173	26	7	2.70	2.10	6.30	17.1	600.5	76.75	80.14	83.54	72.28	75.68	79.07	0.2254	0.2232
150/35	23.3	147	34.4	182	30	7	2.50	2.50	7.50	17.5	675.4	87.03	91.84	96.31	82.61	87.42	91.89	0.2280	0.2258
185/10	5.6	183	10.2	193	18	1	3.60	3.60	3.60	18.0	583.8	68.91	69.62	71.35	65.25	65.96	67.69	0.1826	0.1809
185/25	13.0	187	24.2	211	24	7	3.15	2.10	6.30	18.9	705.5	89.15	92.55	95.94	83.54	86.94	90.33	0.1792	0.1775
185/30	16.3	181	29.6	211	26	7	2.98	2.32	6.96	18.9	732.0	92.67	96.81	100.7	87.23	91.37	95.2	0.1850	0.1833
185/45	23.3	185	43.1	228	30	7	2.80	2.80	8.40	19.6	847.2	109.2	115.2	120.8	103.6	109.7	115.3	0.1817	0.1800
210/10	5.6	204	11.3	215	18	1	3.80	3.80	3.80	19.0	650.5	76.78	77.57	79.50	72.70	73.49	75.42	0.1639	0.1624
210/25	13.0	209	27.1	236	24	7	3.33	2.22	6.66	20.0	788.4	99.63	103.4	107.2	93.36	97.2	100.9	0.1604	0.1589
210/35	16.2	212	34.4	246	26	7	3.22	2.50	7.50	20.4	853.1	108.0	112.8	117.3	101.6	106.4	110.9	0.1585	0.1570
210/50	23.3	209	48.8	258	30	7	2.98	2.98	8.94	20.9	959.7	123.7	130.5	136.8	117.4	124.2	130.6	0.1604	0.1589
240/30	13.0	244	31.7	276	24	7	3.60	2.40	7.20	21.6	921.5	113.1	117.5	121.6	108.2	112.6	116.7	0.1372	0.1359
240/40	16.3	239	38.9	278	26	7	3.42	2.66	7.98	21.7	963.5	122.0	127.4	132.5	114.8	120.3	125.3	0.1405	0.1391
240/55	23.3	241	56.3	298	30	7	3.20	3.20	9.60	22.4	1106.6	140.3	148.2	156.1	133.1	141.0	148.9	0.1391	0.1378
300/15	5.2	297	15.3	312	42	7	3.00	1.67	5.01	23.0	940.2	114.4	116.6	118.7	105.5	107.7	109.8	0.1131	0.1120
300/20	6.9	303	20.9	324	45	7	2.93	1.95	5.85	23.4	1001.8	123.1	126.0	128.9	114.0	116.9	119.8	0.1106	0.1096
300/25	8.8	306	27.1	333	48	7	2.85	2.22	6.66	23.8	1057.9	131.2	135.0	138.8	122.0	125.8	129.6	0.1096	0.1086
300/40	13.0	300	38.9	339	24	7	3.99	2.66	7.98	23.9	1132.0	138.9	144.3	149.4	132.9	138.3	143.4	0.1117	0.1107
300/50	16.3	300	48.8	348	26	7	3.83	2.98	8.94	24.3	1208.6	150.0	156.8	163.2	144.0	150.9	157.2	0.1120	0.1109
300/70	23.3	305	71.3	377	30	7	3.60	3.60	10.8	25.2	1400.5	174.6	179.6	191.7	168.5	173.4	185.6	0.1099	0.1089
400/20	5.1	406	20.9	427	42	7	3.51	1.95	5.85	26.9	1286.3	152.5	155.4	158.3	144.3	147.3	150.2	0.0826	0.0818
400/25	6.9	392	27.1	419	45	7	3.33	2.22	6.66	26.6	1294.7	159.1	162.9	166.7	147.3	151.1	154.9	0.0857	0.0849
400/35	8.8	391	34.4	425	48	7	3.22	2.50	7.50	26.8	1348.7	166.2	171.0	175.5	154.5	159.3	163.8	0.0859	0.0851
400/50	13.0	400	51.8	452	54	7	3.07	3.07	9.21	27.6	1510.5	186.9	194.2	201.4	174.9	182.2	189.4	0.0841	0.0833
400/65	16.3	399	65.1	464	26	7	4.42	3.44	10.3	28.0	1610.0	197.2	206.3	215.4	189.3	198.4	207.5	0.0841	0.0833

续表

标称截面铝合金/钢	钢比（%）	计算面积（mm²）			单线根数 n		单线直径		直径（mm）		单位长度质量（kg/km）	额定拉断力（kN）						20℃直流电阻（Ω/km）	
		铝合金	钢	总和	铝合金	钢	铝合金	钢	钢芯	绞线		JLHA1/G1A	JLHA1/G2A	JLHA1/G3A	JLHA2/G1A	JLHA2/G2A	JLHA2/G3A	JLHA1	JLHA2
400/95	22.9	408	93.3	501	30	19	4.16	2.50	12.5	29.1	1857.9	234.8	247.8	259.9	226.6	239.7	251.8	0.0823	0.0816
460/60	13.0	465	60.2	525	54	7	3.31	3.31	9.93	29.8	1755.9	217.3	225.7	234.1	203.0	211.8	220.2	0.0723	0.0716
500/35	6.9	500	34.6	534	45	7	3.76	2.51	7.53	30.1	1651.3	196.9	201.7	206.2	186.9	191.7	196.2	0.0672	0.0666
500/45	8.8	489	43.1	532	48	7	3.60	2.80	8.40	30.0	1687.0	203.0	209.1	214.7	193.3	199.3	204.9	0.0687	0.0681
500/65	13.0	502	65.1	567	54	7	3.44	3.44	10.3	31.0	1896.5	234.7	243.8	252.9	219.6	228.7	237.8	0.0670	0.0663
630/45	6.9	629	43.4	673	45	7	4.22	2.81	8.43	33.8	2078.4	247.7	253.8	259.5	235.2	241.2	246.9	0.0533	0.0528
630/55	8.8	640	56.3	696	48	7	4.12	3.20	9.60	34.3	2208.3	263.5	271.4	279.3	250.7	258.6	266.5	0.0525	0.0520
630/80	12.7	622	78.9	701	54	19	3.83	2.30	11.5	34.5	2339.7	286.0	297.0	307.3	273.5	284.6	294.8	0.0540	0.0535
710/50	6.9	709	49.2	758	45	7	4.48	2.99	8.97	35.9	2344.2	279.5	286.4	292.7	265.3	272.2	278.6	0.0473	0.0469
710/90	12.6	709	89.6	799	54	19	4.09	2.45	12.3	36.8	2664.6	325.6	338.1	349.8	311.4	323.9	335.6	0.0474	0.0469
720/50	6.9	725	50.1	775	45	7	4.53	3.02	9.06	36.2	2395.9	283.6	290.6	297.7	269.1	276.1	283.2	0.0463	0.0459
800/35	4.3	799	34.6	834	72	7	3.76	2.51	7.53	37.6	2481.9	276.8	281.4	285.6	261.6	266.2	270.4	0.0420	0.0416
800/55	7.0	801	56.3	857	45	7	4.76	3.20	9.60	38.2	2652.7	314.2	322.1	329.9	298.2	306.0	313.9	0.0419	0.0415
800/65	8.3	799	66.6	866	84	7	3.48	3.48	10.4	38.3	2731.7	316.3	325.1	334.0	293.5	302.3	311.2	0.0421	0.0417
800/70	8.8	808	71.3	879	48	7	4.63	3.60	10.8	38.6	2790.1	332.9	337.9	350.0	316.8	321.8	333.9	0.0415	0.0412
800/100	12.7	799	101.7	901	54	19	4.34	2.61	13.1	39.1	3006.6	367.5	381.8	395.0	351.5	365.8	379.0	0.0421	0.0417
900/40	4.3	900	38.9	939	72	7	3.99	2.66	7.98	39.9	2793.8	311.5	316.7	321.5	294.4	299.6	304.4	0.0373	0.0370
900/75	8.3	898	74.9	973	84	7	3.69	3.69	11.1	40.6	3071.3	347.0	352.0	364.1	330.0	335.0	347.0	0.0374	0.0371
1000/45	4.3	1002	43.1	1045	72	7	4.21	2.80	8.40	42.1	3108.8	346.6	352.3	357.7	327.6	333.3	338.6	0.0335	0.0332
1120/50	4.2	1120	47.3	1167	72	19	4.45	1.78	8.90	44.5	3468.0	387.7	393.9	400.2	366.4	372.7	379.0	0.0300	0.0297
1120/90	8.1	1120	91.0	1211	84	19	4.12	2.47	12.4	45.3	3813.4	433.7	445.8	457.1	412.4	424.5	435.8	0.0300	0.0297
1250/50	4.2	1249	52.7	1302	72	19	4.70	1.88	9.40	47.0	3868.6	432.4	439.4	446.5	408.7	415.7	422.7	00269	0.0266
1250/70	5.6	1252	70.1	1322	76	7	4.58	3.57	10.7	4.74	4011.1	447.9	452.6	463.9	424.1	428.8	440.1	00268	0.0266
1250/100	8.1	1248	102	1350	84	19	4.35	2.61	13.1	47.9	4252.3	483.7	497.2	509.7	460.0	473.5	486.0	0.0269	0.0267
1300/105	8.1	1301	106	1406	84	19	4.44	2.66	13.3	48.8	4427.6	503.5	517.6	530.6	478.8	492.9	505.9	0.0259	0.0256
1400/135	9.60	1400	134	1534	88	19	4.50	3.00	15.0	51.0	4926.4	564.3	582.1	598.7	537.7	555.5	572.1	0.0240	0.0238
1440/120	8.13	1439	117	1556	84	19	4.67	2.80	14.0	51.4	4899.7	557.3	572.8	587.3	529.9	545.5	559.9	0.0234	0.0232

表 B-6　JLHA3/G1A、JLHA3/G2A、JLHA3/G3A 和 JLHA4/G1A、JLHA4/G2A、JLHA4/G3A 钢芯铝合金绞线规格

标称截面铝合金/钢	钢比（%）	计算面积（mm²）			单线根数 n		单线直径（mm）		直径（mm）		单位长度质量（kg/km）	额定拉断力（kN）						20℃直流电阻（Ω/km）	
		铝合金	钢	总和	铝合金	钢	铝合金	钢	钢芯	绞线		JLHA3/G1A	JLHA3/G2A	JLHA3/G3A	JLHA4/G1A	JLHA4/G2A	JLHA4/G3A	JLHA3	JLHA4
10/2	16.7	10.6	1.78	12.4	6	1	1.50	1.50	1.50	4.50	42.8	4.72	4.97	5.21	5.14	5.39	5.64	2.8219	2.8961
16/3	16.7	16.1	2.69	18.8	6	1	1.85	1.85	1.85	5.55	65.2	7.18	7.55	7.93	7.82	8.20	8.57	1.8551	1.9039
35/6	16.7	34.9	5.81	40.7	6	1	2.72	2.72	2.72	8.16	140.9	15.34	16.15	16.91	16.73	17.55	18.30	0.8582	0.8808
50/8	16.7	48.3	8.04	56.3	6	1	3.20	3.20	3.20	9.60	195.0	20.43	21.55	22.68	22.84	23.97	25.09	0.6200	0.6363
50/30	58.3	50.7	29.6	80.3	12	7	2.32	2.32	6.96	11.6	371.3	46.42	50.56	54.41	48.45	52.59	56.43	0.5936	0.6092
70/10	16.7	68.0	11.3	79.3	6	1	3.80	3.80	3.80	11.4	275.0	28.81	29.60	31.53	30.51	31.30	33.23	0.4397	0.4513
70/40	58.3	69.7	40.7	110	12	7	2.72	2.72	8.16	13.6	510.4	63.80	69.50	74.78	66.59	72.28	77.57	0.4318	0.4432
95/15	16.2	94.4	15.3	110	26	7	2.15	1.67	5.01	13.6	380.5	41.54	43.68	45.83	45.31	47.46	49.61	0.3190	0.3274
95/20	19.8	95.1	18.8	114	7	7	4.16	1.85	5.55	13.9	408.5	43.90	46.53	49.17	46.28	48.91	51.54	0.3149	0.3232
95/55	58.3	96.5	56.3	153	12	7	3.20	3.20	9.60	16.0	706.4	85.09	92.97	100.9	89.91	97.80	105.7	0.3120	0.3202

续表

标称截面铝合金/钢	钢比（%）	计算面积（mm²）			单线根数 n		单线直径（mm）		直径（mm）		单位长度质量（kg/km）	额定拉断力（kN）						20℃直流电阻（Ω/km）	
		铝合金	钢	总和	铝合金	钢	铝合金	钢	钢芯	绞线		JLHA3/G1A	JLHA3/G2A	JLHA3/G3A	JLHA4/G1A	JLHA4/G2A	JLHA4/G3A	JLHA3	JLHA4
120/7	5.6	119	6.61	125	18	1	2.90	2.90	2.90	14.5	378.9	37.25	38.18	39.04	42.01	42.93	43.79	0.2526	0.2592
120/20	16.3	116	18.8	134	26	7	2.38	1.85	5.55	15.1	466.4	50.93	53.57	56.20	55.56	58.19	60.83	0.2603	0.2671
120/25	19.8	122	24.2	117	7	7	4.72	2.10	6.30	15.7	526.0	56.54	59.93	63.33	59.60	62.99	66.39	0.2446	0.2511
120/70	58.3	122	71.3	193	12	7	3.60	3.60	10.8	18.0	894.0	107.7	112.7	124.8	110.7	115.7	127.8	0.2465	0.2530
150/8	5.6	145	8.04	153	18	1	3.20	3.20	3.20	16.0	461.3	43.59	44.72	45.84	50.83	51.95	53.08	0.2075	0.2129
150/20	12.9	146	18.8	164	24	7	2.78	1.85	5.55	16.7	549.0	58.43	61.07	63.70	64.26	66.90	69.53	0.2065	0.2119
150/25	16.3	149	24.2	173	26	7	2.70	2.10	6.30	17.1	600.5	65.58	68.08	72.37	71.54	74.93	78.33	0.2023	0.2076
150/35	23.3	147	34.4	182	30	7	2.50	2.50	7.50	17.5	675.4	75.99	80.80	85.26	81.88	86.69	91.16	0.2046	0.2100
185/10	5.6	183	10.2	193	18	1	3.60	3.60	3.60	18.0	583.8	55.17	55.88	57.61	59.75	60.46	62.19	0.1639	0.1682
185/25	13.0	187	24.2	211	24	7	3.15	2.10	6.30	18.9	705.5	73.26	76.65	80.04	82.61	86.00	89.40	0.1609	0.1651
185/30	16.3	181	29.6	211	26	7	2.98	2.32	6.96	18.9	732.0	79.07	83.21	87.06	86.32	90.47	94.31	0.1660	0.1704
185/45	23.3	185	43.1	228	30	7	2.80	2.80	8.40	19.6	847.2	95.32	101.4	107.0	102.7	108.7	114.3	0.1631	0.1674
210/10	5.6	204	11.3	215	18	1	3.80	3.80	3.80	19.0	650.5	61.47	62.26	64.19	66.57	67.37	69.29	0.1471	0.1510
210/25	13.0	209	27.1	236	24	7	3.33	2.22	6.66	20.0	788.4	81.87	85.66	89.45	92.32	96.11	99.90	0.1439	0.1477
210/35	16.2	212	34.4	246	26	7	3.22	2.50	7.50	20.4	853.1	89.99	94.80	99.26	100.6	105.4	109.8	0.1422	0.1459
210/50	23.3	209	48.8	258	30	7	2.98	2.98	8.94	20.9	959.7	108.0	114.8	121.1	116.3	123.2	129.5	0.1440	0.1478
240/30	13.0	244	31.7	276	24	7	3.60	2.40	7.20	21.6	921.5	94.73	99.16	103.3	100.8	105.3	109.4	0.1232	0.1264
240/40	16.3	239	38.9	278	26	7	3.42	2.66	7.98	21.7	963.5	101.7	107.1	112.2	113.6	119.1	124.1	0.1261	0.1294
240/55	23.3	241	56.3	298	30	7	3.20	3.20	9.60	22.4	1106.6	119.8	127.7	135.6	131.9	139.8	147.7	0.1249	0.1282
300/15	5.2	297	15.3	312	42	7	3.00	1.67	5.01	23.0	940.2	89.19	91.34	93.48	104.0	106.2	108.3	0.1015	0.1042
300/20	6.9	303	20.9	324	45	7	2.93	1.95	5.85	23.4	1001.8	100.3	103.2	106.2	112.4	115.4	118.3	0.0993	0.1019
300/25	8.8	306	27.1	333	48	7	2.85	2.22	6.66	23.8	1057.9	108.3	112.0	115.8	120.5	124.3	128.1	0.0984	0.1010
300/40	13.0	300	38.9	339	24	7	3.99	2.66	7.98	23.9	1132.0	116.4	121.8	126.9	123.9	129.3	134.4	0.1003	0.1029
300/50	16.3	300	48.8	348	26	7	3.83	2.98	8.94	24.3	1208.6	127.5	134.4	140.7	135.0	141.9	148.2	0.1005	0.1032
300/70	23.3	305	71.3	377	30	7	3.60	3.60	10.8	25.2	1400.5	151.7	156.7	168.8	159.3	164.3	176.4	0.0987	0.1013
400/20	5.1	406	20.9	427	42	7	3.51	1.95	5.85	26.9	1286.3	122.0	124.9	127.8	132.2	135.1	138.0	0.0741	0.0761
460/25	6.9	392	27.1	419	45	7	3.33	2.22	6.66	26.6	1294.7	125.8	129.6	133.3	145.4	149.1	152.9	0.0769	0.0789
400/35	8.8	391	34.4	425	48	7	3.22	2.50	7.50	26.8	1348.7	133.0	137.8	142.3	152.5	157.3	161.8	0.0771	0.0791
400/50	13.0	100	51.8	452	54	7	307	3.07	9.21	27.6	1510.5	152.9	160.2	167.4	172.9	180.2	187.4	0.0754	0.0774
400/65	16.3	399	65.1	464	26	7	4.42	3.44	10.3	28.0	1610.0	163.3	172.4	181.5	173.3	182.4	191.5	0.0755	0.0775
400/95	22.9	408	93.3	501	30	19	4.16	2.50	12.5	29.1	1857.9	200.1	213.2	225.3	210.3	223.4	235.5	0.0739	0.0758
460/60	13.0	465	60.2	525	54	7	3.31	3.31	9.93	29.8	1755.9	177.8	186.2	194.6	201.0	209.4	217.9	0.0649	0.0666
500/35	6.9	500	34.6	534	45	7	3.76	2.51	7.53	30.1	1651.3	159.4	164.3	168.8	171.9	176.7	181.2	0.0603	0.0619
500/45	8.8	489	43.1	532	48	7	3.60	2.80	8.40	30.0	1687.0	166.4	172.4	178.0	178.6	184.6	190.2	0.0617	0.0633
500/65	13.0	502	65.1	567	54	7	3.44	3.44	10.3	31.0	1896.5	192.0	201.1	210.2	217.1	226.2	235.3	0.0601	0.0617
630/45	6.9	629	43.4	673	45	7	4.22	2.81	8.43	33.8	2078.4	194.3	200.3	206.0	210.0	216.1	221.7	0.0479	0.0491
630/55	8.8	640	56.3	696	48	7	4.12	3.20	9.60	34.3	2208.3	209.1	217.0	224.9	225.1	233.0	240.9	0.0471	0.0483
630/80	12.7	622	78.9	701	54	19	3.83	2.30	11.5	34.5	2339.7	239.3	250.4	260.6	254.9	265.9	276.2	0.0485	0.0498
710/50	6.9	709	49.2	758	45	7	4.48	2.99	8.97	35.9	2344.2	219.2	226.1	232.5	236.9	243.8	250.2	0.0425	0.0436
710/90	12.6	709	89.6	799	54	19	4.09	2.45	12.3	36.8	2664.6	265.3	277.8	289.5	283.0	295.6	307.2	0.0425	0.0436
720/50	6.9	725	50.1	775	45	7	4.53	3.02	9.06	36.2	2395.9	222.9	229.0	236.0	240.1	247.1	254.1	0.0415	0.0426
800/35	4.3	799	34.6	834	72	7	3.76	2.51	7.53	37.6	2481.9	219.8	224.4	228.7	238.8	243.4	247.7	0.0377	0.0387
800/55	7.0	801	56.3	857	45	7	4.76	3.20	9.60	38.2	2652.7	246.1	254.0	261.9	266.1	274.0	281.9	0.0376	0.0386
806/65	8.3	799	66.6	866	84	7	3.48	3.48	10.4	38.3	2731.7	251.7	260.6	269.5	289.7	298.5	307.4	0.0378	0.0388
800/70	8.8	808	71.3	879	48	7	4.63	3.60	10.8	38.6	2790.1	264.3	269.2	281.4	284.5	289.4	301.6	0.0373	0.0383

续表

标称截面铝合金/钢	钢比（%）	计算面积（mm²）			单线根数 n		单线直径		直径（mm）		单位长度质量（kg/km）	额定拉断力（kN）						20℃直流电阻（Ω/km）	
		铝合金	钢	总和	铝合金	钢	铝合金	钢	钢芯	绞线		JLHA3/G1A	JLHA3/G2A	JLHA3/G3A	JLHA4/G1A	JLHA4/G2A	JLHA4/G3A	JLHA3	JLHA4
800/100	12.7	799	101.7	901	54	19	4.34	2.61	13.1	39.1	3006.6	299.6	313.9	327.1	319.6	333.8	347.0	0.0378	0.0387
900/40	4.3	900	38.9	939	72	7	3.99	2.66	7.98	39.9	2793.8	247.4	252.6	257.4	268.8	273.9	278.7	0.0335	0.0344
900/75	8.3	898	74.9	973	84	7	3.69	3.69	11.1	40.6	3071.3	283.0	288.0	300.1	304.4	309.4	321.4	0.0336	0.0345
1000/45	4.3	1002	43.1	1045	72	7	4.21	2.80	8.40	42.1	3108.8	265.7	271.4	276.7	289.5	295.2	300.5	0.0301	0.0309
1120/50	4.2	1120	47.3	1167	72	19	4.45	1.78	8.90	44.5	3468.0	297.2	303.5	309.8	323.8	330.1	336.4	0.0269	0.0276
1120/90	8.1	1120	91.0	1211	84	19	4.12	2.47	12.4	45.3	3813.4	343.3	355.4	366.6	369.9	382.0	393.2	0.0269	0.0277
1250/50	4.2	1249	52.7	1302	72	19	4.70	1.88	9.40	47.0	3868.6	331.6	338.6	345.6	361.2	368.2	375.3	0.0241	0.0248
1250/70	5.6	1252	70.1	1322	76	7	4.58	3.57	10.7	47.4	4011.1	346.8	351.5	362.8	376.5	381.2	392.5	0.0241	0.0247
1250/100	8.1	1248	102	1350	84	19	4.35	2.61	13.1	47.9	4252.3	382.9	396.4	408.9	412.5	426.0	438.6	0.0242	0.0248
1300/105	8.1	1301	106	1406	84	19	4.44	2.66	13.3	48.8	4427.6	398.5	412.6	425.6	429.4	443.5	456.5	0.0232	0.0238
1400/135	9.60	1400	134	1534	88	19	4.50	3.00	15.0	51.0	4926.4	451.3	469.1	485.7	484.5	502.4	518.9	0.0216	0.0221
1440/120	8.13	1439	117	1556	84	19	4.67	2.80	14.0	51.4	4899.7	441.1	456.6	471.1	475.3	490.8	505.3	0.0210	0.0215

B.5 铝合金芯铝绞线

铝合金芯铝绞线标准见表 B-7、表 B-8，摘自 GB/T 1179—2017。

表 B-7　　JL/LHA1、JL1/LHA1、JL2/LHA1、JL3/LHA1 铝合金芯铝绞线规格

标称截面铝/铝合金	计算面积（mm²）			单线根数 n		单线直径（mm）		直径（mm）		单位长度质量（kg/km）	额定拉断力（kN）	20℃直流电阻（Ω/km）			
	铝	铝合金	总和	铝	铝合金	铝	铝合金	铝合金芯	绞线			JL/LHA1	JL1/LHA1	JL2/LHA1	JL3/LHA1
25/20	24.3	18.2	42.5	4	3	2.78	2.78	—	8.34	116.6	9.75	0.7181	0.7146	0.7111	0.7076
40/30	38.3	28.7	67.0	4	3	3.49	3.49	—	10.5	183.7	15.17	0.4557	0.4534	0.4512	0.4490
60/45	60.8	45.6	106	4	3	4.40	4.40	—	13.2	292.0	23.38	0.2867	0.2853	0.2838	0.2825
80/50	83.1	48.5	132	12	7	2.97	2.97	8.91	14.9	362.4	29.11	0.2306	0.2293	0.2281	0.2269
105/60	106	62.1	168	12	7	3.36	3.36	10.1	16.8	463.8	36.72	0.1802	0.1792	0.1782	0.1773
135/80	134	78.1	212	12	7	3.77	3.77	11.3	18.9	583.9	44.82	0.1431	0.1423	0.1416	0.1408
135/140	134	142	276	18	19	3.08	3.08	15.4	21.6	760.2	65.84	0.1127	0.1122	0.1117	0.1113
135/145	136	143	279	18	19	3.10	3.10	15.5	21.7	770.1	66.69	0.1112	0.1108	0.1103	0.1098
165/170	163	173	336	18	19	3.40	3.40	17.0	23.8	926.4	80.23	0.0925	0.0921	0.0917	0.0913
165/175	165	175	340	18	19	3.42	3.42	17.1	23.9	937.3	81.17	0.0914	0.0910	0.0906	0.0902
170/95	167	97.4	264	12	7	4.21	4.21	12.6	21.1	729.6	55.89	0.1150	0.1144	0.1138	0.1132
130/140	132	139	270	18	19	3.05	3.05	15.3	21.4	744.3	64.56	0.1147	0.1142	0.1138	0.1133
210/220	207	219	426	18	19	3.83	3.83	19.2	26.8	1175.5	98.69	0.0729	0.0726	0.0723	0.0720
210/230	219	232	451	18	19	3.94	3.94	19.7	27.6	1244.0	104.4	0.0689	0.0686	0.0683	0.0680
265/60	263	61.3	324	30	7	3.34	3.34	10.0	23.4	894.2	62.31	0.0914	0.0908	0.0902	0.0896
165/175	166	176	342	18	19	3.43	3.43	17.2	24.0	942.8	81.65	0.0909	0.0905	0.0901	0.0897
335/80	335	78.1	413	30	7	3.77	3.77	11.3	26.4	1139.3	76.96	0.0717	0.0713	0.0708	0.0703
210/220	211	222	433	18	19	3.86	3.86	19.3	27.0	1194.0	100.2	0.0718	0.0714	0.0711	0.0708
365/165	366	165	531	42	19	3.33	3.33	16.7	30.0	1467.2	111.4	0.0568	0.0565	0.0562	0.0559
375/85	375	87.5	463	30	7	3.99	3.99	12.0	27.9	1276.2	86.21	0.0640	0.0636	0.0632	0.0628
235/250	238	251	488	18	19	4.10	4.10	20.5	28.7	1347.1	113.1	0.0636	0.0633	0.0631	0.0628
415/95	418	97.4	515	30	7	4.21	4.21	12.6	29.5	1420.8	95.98	0.0575	0.0571	0.0568	0.0564
260/275	264	278	542	18	19	4.32	4.32	21.6	30.2	1495.6	125.6	0.0573	0.0570	0.0568	0.0566

续表

标称截面 铝/铝合金	计算面积（mm²）			单线根数 n		单线直径（mm）		直径（mm）		单位长度质量（kg/km）	额定拉断力（kN）	20℃直流电阻（Ω/km）			
	铝	铝合金	总和	铝	铝合金	铝	铝合金	铝合金芯	绞线			JL/LHA1	JL1/LHA1	JL2/LHA1	JL3/LHA1
465/110	469	109	578	30	7	4.46	4.46	13.4	31.2	1594.5	107.7	0.0513	0.0509	0.0506	0.0502
465/210	464	210	674	42	19	3.75	3.75	18.8	33.8	1860.6	137.0	0.0448	0.0446	0.0443	0.0440
505/65	505	65.4	570	54	7	3.45	3.45	10.4	31.1	1575.2	103.5	0.0515	0.0511	0.0507	0.0504
455/205	456	207	663	42	19	3.72	3.72	18.6	33.5	1831.0	134.8	0.0455	0.0453	0.0450	0.0448
270/420	272	420	692	24	37	3.80	3.80	26.6	34.2	1910.5	169.1	0.0456	0.0454	0.0453	0.0451
515/230	515	233	748	42	19	3.95	3.95	19.8	35.6	2064.4	152.0	0.0404	0.0402	0.0399	0.0397
535/240	533	239	772	42	37	4.02	2.87	20.1	36.2	2135.0	159.2	0.0391	0.0389	0.0387	0.0384
307/470	306	472	778	24	37	4.03	4.03	28.2	36.3	2148.7	190.2	0.0405	0.0404	0.0403	0.0401
580/260	579	262	841	42	19	4.19	4.19	21.0	37.7	2322.9	171.1	0.0359	0.0357	0.0355	0.0353
345/530	345	532	878	24	37	4.28	4.28	30.0	38.5	2423.6	214.5	0.0360	0.0358	0.0357	0.0356
650/295	650	294	944	42	19	4.44	4.44	22.2	40.0	2608.3	192.1	0.0320	0.0318	0.0316	0.0314
665/300	668	301	969	42	37	4.50	3.22	22.5	40.5	2679.0	199.9	0.0312	0.0310	0.0308	0.0306
570/390	568	389	957	54	37	3.66	3.66	25.6	40.3	2646.7	197.0	0.0320	0.0318	0.0317	0.0315
820/215	817	215	1032	72	19	3.80	3.80	19.0	41.8	2852.9	185.4	0.0289	0.0287	0.0285	0.0283
630/430	632	433	1065	54	37	3.86	3.86	27.0	42.5	2943.8	219.1	0.0288	0.0286	0.0285	0.0283
745/335	747	336	1083	42	37	4.76	3.40	23.8	42.8	2994.2	223.3	0.0279	0.0277	0.0276	0.0274
800/550	803	550	1352	54	37	4.35	4.35	30.5	47.9	3738.7	278.3	0.0227	0.0225	0.0224	0.0223
915/240	914	241	1155	72	19	4.02	4.02	20.1	44.2	3192.8	207.5	0.0258	0.0256	0.0254	0.0253
705/485	709	486	1196	54	37	4.09	4.09	28.6	45.0	3305.1	246.0	0.0256	0.0255	0.0254	0.0252
1020/270	1021	270	1291	72	19	4.25	4.25	21.3	46.8	3568.6	231.9	0.0231	0.0229	0.0228	0.0226
790/540	792	542	1334	54	37	4.32	4.32	30.2	47.5	3687.3	274.5	0.0230	0.0229	0.0227	0.0226
1145/300	1145	302	1447	72	19	4.50	4.50	22.5	49.5	4000.8	260.0	0.0206	0.0204	0.0203	0.0202

表 B-8　JL/LHA2、JL1/LHA2、JL2/LHA2、JL3/LHA2 铝合金芯铝绞线规格

标称截面 铝/铝合金	计算面积（mm²）			单线根数 n		单线直径（mm）		直径（mm）		单位长度质量（kg/km）	额定拉断力（kN）	20℃直流电阻（Ω/km）			
	铝	铝合金	总和	铝	铝合金	铝	铝合金	铝合金芯	绞线			JL/LHA2	JL1/LHA2	JL2/LHA2	JL3/LHA2
25/20	24.3	18.2	42.5	4	3	2.78	2.78	—	8.34	116.6	9.23	0.7155	0.7119	0.7084	0.7050
40/30	38.3	28.7	67.0	4	3	3.49	3.49	—	10.5	183.7	14.36	0.4540	0.4517	0.4495	0.4473
60/45	60.8	45.6	106	4	3	4.40	4.40	—	13.2	292.0	22.52	0.2856	0.2842	0.2828	0.2814
80/50	83.1	48.5	132	12	7	2.97	2.97	8.91	14.9	362.4	27.72	0.2298	0.2286	0.2274	0.2262
105/60	106	62.1	168	12	7	3.36	3.36	10.1	16.8	463.8	34.95	0.1796	0.1786	0.1777	0.1767
130/140	132	139	270	18	19	3.05	3.05	15.3	21.4	744.3	60.60	0.1142	0.1137	0.1133	0.1128
135/80	134	78.1	212	12	7	3.77	3.77	11.3	18.9	583.9	43.33	0.1426	0.1419	0.1411	0.1404
135/140	134	142	276	18	19	3.08	3.08	15.4	21.6	760.2	61.80	0.1122	0.1117	0.1112	0.1108
135/145	136	143	279	18	19	3.10	3.10	15.5	21.7	770.1	62.61	0.1107	0.1103	0.1098	0.1093
165/170	163	173	336	18	19	3.40	3.40	17.0	23.8	926.4	75.31	0.0921	0.0917	0.0913	0.0909
165/175	165	175	340	18	19	3.42	3.42	17.1	23.9	937.3	76.20	0.0910	0.0906	0.0902	0.0898
170/95	167	97.4	264	12	7	4.21	4.21	12.6	21.1	729.6	54.04	0.1146	0.1140	0.1134	0.1128
210/220	207	219	426	18	19	3.83	3.83	19.2	26.8	1175.5	94.53	0.0726	0.0722	0.0719	0.0716
210/230	219	232	451	18	19	3.94	3.94	19.7	27.6	1244.0	100.0	0.0686	0.0683	0.0680	0.0677
235/250	238	251	488	18	19	4.10	4.10	20.5	28.7	1347.1	108.3	0.0633	0.0630	0.0628	0.0625
260/275	264	278	542	18	19	4.32	4.32	21.6	30.2	1495.6	120.3	0.0570	0.0568	0.0565	0.0563
265/60	263	61.3	324	30	7	3.34	3.34	10.0	23.4	894.2	60.56	0.0913	0.0906	0.0900	0.0894
270/420	272	420	692	24	37	3.80	3.80	26.6	34.2	1910.5	161.1	0.0454	0.0452	0.0450	0.0449
307/470	306	472	778	24	37	4.03	4.03	28.2	36.3	2148.7	181.2	0.0403	0.0402	0.0401	0.0399
335/80	335	78.1	413	30	7	3.77	3.77	11.3	26.4	1139.3	75.48	0.0716	0.0711	0.0707	0.0702

续表

标称截面铝/铝合金	计算面积（mm²）			单线根数 n		单线直径（mm）		直径（mm）		单位长度质量（kg/km）	额定拉断力（kN）	20℃直流电阻（Ω/km）			
	铝	铝合金	总和	铝	铝合金	铝	铝合金	铝合金芯	绞线			JL/LHA2	JL1/LHA2	JL2/LHA2	JL3/LHA2
345/530	345	532	878	24	37	4.28	4.28	30.0	38.5	2423.6	204.4	0.0358	0.0356	0.0355	0.0354
365/165	366	165	531	42	19	3.33	3.33	16.7	30.0	1467.2	106.7	0.0567	0.0564	0.0560	0.0557
375/85	375	87.5	463	30	7	3.99	3.99	12.0	27.9	1276.2	84.55	0.0639	0.0635	0.0631	0.0627
415/95	418	97.4	515	30	7	4.21	4.21	12.6	29.5	1420.8	94.13	0.0574	0.0570	0.0567	0.0563
455/205	456	207	663	42	19	3.72	3.72	18.6	33.5	1831.0	130.9	0.0454	0.0452	0.0449	0.0446
465/110	469	109	578	30	7	4.46	4.46	13.4	31.2	1594.5	105.6	0.0512	0.0508	0.0505	0.0502
465/210	464	210	674	42	19	3.75	3.75	18.8	33.8	1860.6	133.0	0.0447	0.0444	0.0442	0.0439
505/65	505	65.4	570	54	7	3.45	3.45	10.4	31.1	1575.2	101.6	0.0514	0.0511	0.0507	00503
515/230	515	233	748	42	19	3.95	3.95	19.8	35.6	2064.4	147.6	0.0403	0.0401	0.0398	0.0396
535/240	533	239	772	42	37	4.02	2.87	20.1	36.2	2135.0	152.4	0.0390	0.0388	0.0386	0.0383
570/390	568	389	957	54	37	3.66	3.66	25.6	40.3	2646.7	190.0	0.0319	0.0317	0.0316	0.0314
580/260	579	262	841	42	19	4.19	4.19	21.0	37.7	2322.9	166.1	0.0358	0.0356	0.0354	0.0352
630/430	632	433	1065	54	37	3.86	3.86	27.0	42.5	2943.8	211.3	0.0287	0.0285	0.0284	0.0282
650/295	650	294	944	42	19	4.44	4.44	22.2	40.0	2608.3	186.5	0.0319	0.0317	0.0315	0.0313
665/300	668	301	969	42	37	4.50	3.22	22.5	40.5	2679.0	191.3	0.0311	0.0309	0.0307	0.0306
705/485	709	486	1196	54	37	4.09	4.09	28.6	45.0	3305.1	237.3	0.0255	0.0254	0.0253	0.0252
745/335	747	336	1083	42	37	4.76	3.40	23.8	42.8	2994.2	213.7	0.0278	0.0277	0.0275	0.0273
790/540	792	542	1334	54	37	4.32	4.30	30.2	47.5	3687.3	264.7	0.0229	0.0228	0.0227	0.0226
800/550	803	550	1352	54	37	4.35	4.35	30.5	47.9	3738.7	268.4	0.0226	0.0225	0.0224	0.0222
820/215	817	215	1032	72	19	3.80	3.80	19.0	41.8	2852.9	181.5	0.0288	0.0286	0.0284	0.0282
915/240	914	241	1155	72	19	4.02	4.02	20.1	44.2	3192.8	203.1	0.0257	0.0256	0.0254	0.0252
1020/270	1021	270	1291	72	19	4.25	4.25	21.3	46.8	3568.6	227.0	0.0230	0.0229	0.0227	0.0226
1145/300	1145	302	1447	72	19	4.50	4.50	22.5	49.5	4000.8	254.5	0.0205	0.0204	0.0203	0.0201

B.6 铝包钢芯铝绞线

铝包钢芯铝绞线标准见表 B-9、表 B-10，摘自 GB/T 1179—2017。

表 B-9　　JL/LB14、JL1/LB14、JL2/LB14、JL3/LB14 铝包钢芯铝绞线规格

标称截面铝/铝包钢	钢比（%）	计算面积（mm²）			单线根数 n		单线直径（mm）		直径（mm）		单位长度质量（kg/km）	额定拉断力（kN）	20℃直流电阻（Ω/km）			
		铝	铝包钢	总和	铝	铝包钢	铝	铝包钢	铝包钢芯	绞线			JL/LB14	JL1/LB14	JL2/LB14	JL3/LB14
25/4	16.7	24.1	4.01	28.1	6	1	2.26	2.26	2.26	6.78	94.7	9.87	1.1476	1.1386	1.1297	1.1211
40/5	16.7	38.3	6.38	44.7	6	1	2.85	2.85	2.85	8.55	150.6	15.50	0.7216	0.7160	0.7104	0.7049
50/8	16.7	48.3	8.04	56.3	6	1	3.20	3.20	3.20	9.60	189.8	19.06	0.5724	0.5679	0.5635	0.5592
60/10	16.7	60.4	10.1	70.5	6	1	3.58	3.58	3.58	10.7	237.6	23.15	0.4573	0.4537	0.4502	0.4468
70/10	16.7	68.0	11.3	79.3	6	1	3.80	3.80	3.80	11.4	267.7	26.08	0.4059	0.4027	0.3996	0.3965
70/40	58.3	69.7	40.7	110	12	7	2.72	2.72	8.16	13.6	484.2	69.21	0.3645	0.3619	0.3593	0.3568
95/15	16.7	95.9	16.0	112	6	1	4.51	4.51	4.51	13.5	377.1	36.74	0.2882	0.2859	0.2837	0.2815
95/55	58.3	96.5	56.3	153	12	7	3.20	3.20	9.60	16.0	670.2	93.61	0.2633	0.2615	0.2596	0.2578
120/7	5.6	119	6.61	125	18	1	2.90	2.90	2.90	14.5	374.6	29.53	0.2391	0.2372	0.2353	0.2335
120/70	58.3	122	71.3	193	12	7	3.60	3.60	10.8	18.0	848.2	115.0	0.2081	0.2066	0.2051	0.2037

续表

标称截面铝/铝包钢	钢比（%）	计算面积（mm²）			单线根数 *n*		单线直径（mm）		直径（mm）		单位长度质量（kg/km）	额定拉断力（kN）	20℃直流电阻（Ω/km）			
		铝	铝包钢	总和	铝	铝包钢	铝	铝包钢	铝包钢芯	绞线			JL/LB14	JL1/LB14	JL2/LB14	JL3/LB14
150/8	5.6	145	8.04	153	18	1	3.20	3.20	3.20	16.0	456.2	34.98	0.1964	0.1948	0.1933	0.1917
150/35	23.3	147	34.4	182	30	7	2.50	2.50	7.50	17.5	653.3	74.22	0.1861	0.1846	0.1832	0.1818
185/10	5.6	183	10.2	193	18	1	3.60	3.60	3.60	18.0	577.3	42.95	0.1552	0.1539	01527	0.1515
185/30	16.3	181	29.6	211	26	7	2.98	2.32	6.96	18.9	712.9	72.55	0.1534	0.1522	0.1510	0.1498
185/45	23.3	185	43.1	228	30	7	2.80	2.80	8.40	19.6	819.5	92.18	0.1483	0.1472	01461	0.1450
200/10	5.6	198	110	209	18	1	3.74	3.74	3.74	18.7	623.1	46.36	0.1438	0.1426	0.1415	0.1404
200/30	16.3	192	31.4	224	26	7	3.07	2.39	7.17	19.5	756.6	76.04	0.1445	0.1434	0.1423	0.1412
210/10	5.6	204	11.3	215	18	1	3.80	3.80	3.89	19.0	643.3	47.86	0.1393	0.1382	0.1371	0.1360
210/35	16.2	212	34.4	246	26	7	3.22	2.50	7.50	20.4	831.1	83.38	0.1314	0.1304	0.1294	0.1284
210/50	23.3	209	48.8	258	30	7	2.98	2.98	8.94	20.9	928.3	104.4	0.1310	0.1299	0.1289	0.1280
240/30	13.0	244	31.7	276	24	7	3.60	2.40	7.20	21.6	901.1	83.74	0.1146	0.1137	0.1128	0.1120
240/40	16.3	239	38.9	278	26	7	3.42	2.66	7.98	21.7	938.5	94.26	0.1165	0.1156	0.1147	0.1138
240/55	23.3	241	56.3	298	30	7	3.20	3.20	9.60	22.4	1070.4	117.5	0.1136	0.1127	0.1118	0.1110
250/25	9.8	244	24.0	268	22	7	3.76	2.09	6.27	21.3	846.0	72.95	0.1154	0.1145	0.1136	0.1127
250/40	16.3	240	39.2	279	26	7	3.43	2.67	6.01	21.7	944.4	94.90	0.1158	0.1149	0.1140	0.1131
300/25	8.8	306	27.1	333	48	7	2.85	2.22	6.66	23.8	1040.5	90.26	0.0925	0.0917	0.0910	0.0903
300/40	13.0	300	38.9	339	24	7	3.99	2.66	7.98	23.9	1106.9	102.9	0.0933	0.0926	0.0919	0.0911
300/50	16.3	300	48.8	348	26	7	3.83	2.98	8.94	24.3	1177.2	116.8	0.0929	0.0921	0.0914	0.0907
300/70	23.3	305	71.3	377	30	7	3.60	3.60	10.8	25.2	1354.7	144.3	0.0897	0.0890	0.0884	0.0877
385/50	13.0	387	50.1	437	54	7	3.02	3.02	9.06	27.2	1429.5	133.0	0.0726	0.0720	0.0714	0.0709
400/35	8.8	391	34.4	425	48	7	3.22	2.50	7.50	26.8	1326.6	112.9	0.0724	0.0719	0.0713	0.0707
400/50	13.0	400	51.8	452	54	7	3.07	3.07	9.21	27.6	1477.2	137.5	0.0702	0.0697	0.0691	0.0686
400/65	16.3	399	65.1	464	26	7	4.42	3.44	10.3	28.0	1568.1	153.6	0.0697	0.0692	0.0686	0.0681
400/95	22.9	408	93.3	501	30	19	4.16	2.50	12.5	29.1	1797.8	196.7	0.0673	0.0668	0.0662	0.0657
440/30	6.9	443	30.6	474	45	7	3.54	2.36	7.08	28.3	1443.4	114.0	0.0642	0.0637	0.0632	0.0627
435/55	13.0	437	56.6	494	54	7	3.21	3.21	9.63	28.9	1615.0	150.3	0.0642	0.0637	0.0632	0.0627
490/35	6.9	492	34.1	526	45	7	3.73	2.49	7.47	29.9	1603.2	126.7	0.0578	0.0574	0.0569	0.0565
485/60	13.0	485	62.8	547	54	7	3.38	3.38	10.1	30.4	1790.6	166.6	0.0579	0.0575	0.0570	0.0566
550/40	6.9	551	38.0	589	45	7	3.95	2.63	7.89	31.6	1796.5	141.8	0.0516	0.0512	0.0507	0.0503
620/40	6.9	620	42.8	663	45	7	4.19	2.79	8.37	33.5	2021.4	159.6	0.0458	0.0455	0.0451	0.0447
610/75	12.7	609	77.6	687	54	19	3.79	2.28	11.1	34.1	2243.2	206.9	0.0461	0.0457	0.0454	0.0450
630/15	6.9	623	43.1	667	45	7	4.20	2.80	8.40	33.6	2031.8	160.5	0.0456	0.0452	0.0449	0.0445
630/55	8.8	640	56.3	696	48	7	4.12	3.20	9.69	34.3	2172.1	180.1	0.0442	0.0439	0.0435	0.0432
700/50	6.0	697	48.2	745	45	7	4.44	2.96	8.88	35.5	2270.7	179.4	0.0408	0.0405	0.0402	0.0398
700/85	12.7	689	87.4	776	54	19	4.03	2.42	12.1	36.3	2534.0	233.4	0.0408	0.0405	0.0401	0.0398
720/50	6.9	725	50.1	775	45	7	4.53	3.02	9.06	36.2	2363.7	185.2	0.0392	0.0389	0.0386	0.0383
790/35	4.3	791	34.1	825	72	7	3.74	2.49	7.47	37.4	2432.0	165.9	0.0362	0.0359	0.0356	0.0353
785/65	8.3	785	65.4	851	84	7	3.45	3.45	10.4	38.0	2642.7	208.9	0.0362	0.0359	0.0356	0.0353
775/100	12.7	777	98.6	875	54	19	4.28	2.57	12.9	38.5	2858.1	263.3	0.0362	0.0359	0.0356	0.0353
800/55	6.9	814	56.3	871	45	7	4.80	3.20	9.60	38.4	2653.8	208.0	0.0349	0.0346	0.0344	0.0341

续表

标称截面铝/铝包钢	钢比（%）	计算面积（mm²）			单线根数 n		单线直径（mm）		直径（mm）		单位长度质量（kg/km）	额定拉断力（kN）	20℃直流电阻（Ω/km）			
		铝	铝包钢	总和	铝	铝包钢	铝	铝包钢	铝包钢芯	绞线			JL/LB14	JL1/LB14	JL2/LB14	JL3/LB14
800/70	8.8	808	71.3	879	48	7	4.63	3.60	10.8	38.6	2744.3	224.8	0.0350	0.0348	0.0345	0.0342
800/100	12.7	795	101	896	54	19	4.33	2.60	13.0	39.0	2925.2	269.5	0.0353	0.0350	0.0348	0.0345
880/75	8.3	884	73.6	957	84	7	3.66	3.66	11.0	40.3	2974.2	228.1	0.0321	0.0319	0.0316	0.0314
890/115	12.7	890	113	1002	54	19	4.58	2.75	13.8	41.2	3272.7	301.5	0.0316	0.0313	0.0311	0.0308
900/40	4.3	900	38.9	939	72	7	3.99	2.66	7.98	39.9	2768.8	188.9	0.0318	0.0315	0.0313	0.0310
990/45	4.3	988	42.8	1031	72	7	4.18	2.79	8.37	41.8	3039.5	207.5	0.0290	0.0287	0.0285	0.0283
1025/45	4.3	1021	44.3	1066	72	7	4.25	2.84	8.52	42.5	3142.9	214.7	0.0280	0.0278	0.0276	0.0274
1015/85	8.3	1014	84.5	1098	84	7	3.92	3.92	11.8	43.1	3411.8	261.6	0.0280	0.0278	0.0276	0.0273
1135/50	4.3	1135	49.2	1184	72	7	4.48	2.99	8.97	44.8	3491.4	238.4	0.0252	0.0250	0.0248	0.0246
1100/90	8.2	1098	89.6	1188	84	19	4.08	2.45	12.3	44.9	3684.2	286.9	0.0259	0.0257	0.0255	0.0253
1225/100	8.2	1226	100	1326	84	19	4.31	2.59	13.0	47.4	4112.3	320.4	0.0232	0.0230	0.0228	0.0226
1270/105	8.1	1271	103	1375	84	19	4.39	2.63	13.2	48.3	4261.9	331.5	0.0223	0.0222	0.0220	0.0218
1405/115	8.1	1408	114	1523	84	19	4.62	2.77	13.9	50.8	4721.4	367.4	0.0202	0.0200	0.0199	0.0197

表 B-10　　JL/LB20A、JL1/LB20A、JL2/LB20A、JL3/LB20A 铝包钢芯铝绞线规格

标称截面铝/铝包钢	钢比（%）	计算面积（mm²）			单线根数 n		单线直径（mm）		直径（mm）		单位长度质量（kg/km）	额定拉断力（kN）	20℃直流电阻（Ω/km）			
		铝	铝包钢	总和	铝	铝包钢	铝	铝包钢	铝包钢芯	绞线			JL/LB20A	JL1/LB20A	JL2/LB20A	JL3/LB20A
15/3	16.7	15.4	2.57	18.0	6	1	1.81	1.81	1.81	5.43	59.3	5.94	1.7594	1.7458	1.7325	1.7194
25/4	16.7	24.1	4.01	28.1	6	1	2.26	2.26	2.26	6.78	92.5	9.03	1.1285	1.1198	1.1112	1.1028
40/5	16.7	38.3	6.38	44.7	6	1	2.85	2.85	2.85	8.55	147.1	14.16	0.7096	0.7042	0.6988	0.6935
50/8	16.7	48.3	8.04	56.3	6	1	3.20	3.20	3.20	9.60	185.4	17.61	0.5629	0.5585	0.5543	0.5501
60/10	16.7	60.4	10.1	70.5	6	1	3.58	3.58	3.58	10.7	232.1	21.14	0.4497	0.4463	0.4429	0.4395
70/10	16.7	68.0	11.3	79.3	6	1	3.80	3.80	3.80	11.4	261.5	23.36	0.3992	0.3961	0.3931	0.3901
70/40	58.3	69.7	40.7	110	12	7	2.72	2.72	8.16	13.6	461.8	60.66	0.3458	0.3434	0.3411	0.3388
95/15	16.7	95.9	16.0	112	6	1	4.51	4.51	4.51	13.5	368.3	31.79	0.2834	0.2812	0.2790	0.2769
95/20	19.8	95.1	18.8	114	7	7	4.16	1.85	5.55	13.9	386.0	37.80	0.2831	0.2810	0.2789	0.2768
95/55	58.3	96.5	56.3	153	12	7	3.20	3.20	9.60	16.0	639.1	83.48	0.2498	0.2481	0.2464	0.2448
120/7	5.6	119	6.61	125	18	1	2.90	2.90	2.90	14.5	371.0	28.14	0.2378	0.2359	0.2340	0.2322
120/20	16.3	121	19.6	140	26	7	2.43	1.89	5.67	15.4	462.9	44.67	0.2269	0.2252	0.2235	0.2218
120/25	19.8	122	24.2	147	7	7	4.72	2.10	6.30	15.7	497.1	48.69	0.2199	0.2182	0.2166	0.2150
120/70	58.3	122	71.3	193	12	7	3.60	3.60	10.8	18.0	808.9	100.8	0.1974	0.1960	0.1947	0.1934
150/8	5.6	145	8.04	153	18	1	3.20	3.20	3.20	16.0	451.7	33.54	0.1953	0.1937	0.1922	0.1907
150/20	12.9	146	18.8	164	24	7	2.78	1.85	5.55	16.7	526.5	47.34	0.1898	0.1883	0.1868	0.1854
150/25	16.3	149	24.2	173	26	7	2.70	2.10	6.30	17.1	571.5	54.40	0.1838	0.1824	0.1810	0.1796
150/35	23.3	147	34.4	182	30	7	2.50	2.50	7.50	17.5	634.3	67.00	0.1818	0.1804	0.1791	0.1778
155/25	16.3	153	24.9	178	26	7	2.74	2.13	6.39	17.4	588.4	55.99	0.1785	0.1771	0.1758	0.1744
185/10	5.6	183	10.2	193	18	1	3.60	3.60	3.60	18.0	571.7	40.92	0.1543	0.1531	0.1518	0.1507

续表

标称截面铝/铝包钢	钢比（%）	计算面积（mm²）			单线根数 n		单线直径（mm）		直径（mm）		单位长度质量（kg/km）	额定拉断力（kN）	20℃直流电阻（Ω/km）			
		铝	铝包钢	总和	铝	铝包钢	铝	铝包钢	铝包钢芯	绞线			JL/LB20A	JL1/LB20A	JL2/LB20A	JL3/LB20A
185/25	13.0	187	24.2	211	24	7	3.15	2.10	6.30	18.9	676.5	59.96	0.1478	0.1466	0.1455	0.1444
185/30	16.3	181	29.6	211	26	7	2.98	2.32	6.96	18.9	696.6	66.34	0.1509	0.1497	0.1486	0.1474
185/45	23.3	185	43.1	228	30	7	2.80	2.80	8.40	19.6	795.7	83.13	0.1449	0.1438	0.1428	0.1417
200/10	5.6	198	11.0	209	18	1	3.74	3.74	3.74	18.7	617.1	43.72	0.1429	0.1418	0.1407	0.1396
200/30	16.3	192	31.4	224	26	7	3.07	2.39	7.17	19.5	739.3	69.44	0.1422	0.1411	0.1400	0.1389
210/10	5.6	204	11.3	215	18	1	3.80	3.80	3.80	19.0	637.0	45.14	0.1385	0.1374	0.1363	0.1352
210/25	13.0	209	27.1	236	24	7	3.33	2.22	6.66	20.0	736.1	67.00	0.1322	0.1312	0.1302	0.1292
210/35	16.2	212	34.4	246	26	7	3.22	2.50	7.50	20.4	812.1	76.17	0.1293	0.1283	0.1273	0.1263
210/50	23.3	209	48.8	258	30	7	2.98	2.98	8.94	20.9	901.3	94.16	0.1280	0.1270	0.1260	0.1251
240/30	13.0	244	31.7	276	24	7	3.60	2.40	7.20	21.6	883.6	77.09	0.1131	0.1123	0.1114	0.1105
240/40	16.3	239	38.9	278	26	7	3.42	2.66	7.98	21.7	917.0	86.09	0.1146	0.1137	0.1128	0.1120
240/55	23.3	241	56.3	298	30	7	3.20	3.20	9.60	22.4	1039.3	107.4	0.1110	0.1101	0.1093	0.1085
250/25	9.8	244	24.0	268	22	7	3.76	2.09	6.27	21.3	832.7	67.90	0.1143	0.1134	0.1125	0.1116
250/40	16.3	240	39.2	279	26	7	3.43	2.67	8.01	21.7	922.8	86.67	0.1139	0.1130	0.1121	0.1113
300/15	5.2	297	15.3	312	42	7	3.00	1.67	5.01	23.0	921.8	68.87	0.0957	0.0949	0.0941	0.0934
300/20	6.9	303	20.9	324	45	7	2.93	1.95	5.85	23.4	976.8	76.67	0.0931	0.0923	0.0916	0.0909
300/25	8.8	306	27.1	333	48	7	2.85	2.22	6.66	23.8	1025.6	84.57	0.0916	0.0909	0.0902	0.0895
300/40	13.0	300	38.9	339	24	7	3.99	2.66	7.98	23.9	1085.5	94.69	0.0921	0.0914	0.0907	0.0900
300/50	16.3	300	48.8	348	26	7	3.83	2.98	8.94	24.3	1150.3	106.5	0.0913	0.0906	0.0899	0.0893
300/70	23.3	305	71.3	377	30	7	3.60	3.60	10.8	25.2	1315.4	130.1	0.0877	0.0870	0.0864	0.0857
310/20	6.9	310	21.3	331	45	7	2.96	1.97	5.91	23.7	996.9	78.25	0.0912	0.0905	0.0897	0.0890
395/25	6.9	394	27.1	421	45	7	3.34	2.22	6.66	26.7	1268.8	97.6	0.0716	0.0710	0.0705	0.0699
385/50	13.0	387	50.1	437	54	7	3.02	3.02	9.06	27.2	1401.8	124.0	0.0716	0.0711	0.0705	0.0700
400/20	5.1	406	20.9	427	42	7	3.51	1.95	5.85	26.9	1261.4	90.11	0.0699	0.0693	0.0688	0.0682
400/25	6.9	392	27.1	419	45	7	3.33	2.22	6.66	26.6	1262.3	97.2	0.0720	0.0715	0.0709	0.0703
400/35	8.8	391	34.4	425	48	7	3.22	2.50	7.50	26.8	1307.6	105.7	0.0718	0.0712	0.0707	0.0701
400/50	13.0	400	51.8	452	54	7	3.07	3.07	9.21	27.6	1448.6	128.1	0.0693	0.0688	0.0682	0.0677
400/65	16.3	399	65.1	464	26	7	4.42	3.44	10.3	28.0	1532.2	140.6	0.0686	0.0681	0.0675	0.0670
400/95	22.9	408	93.3	501	30	19	4.16	2.50	12.5	29.1	1746.1	177.2	0.0658	0.0653	0.0648	0.0643
440/30	6.9	443	30.6	474	45	7	3.54	2.36	7.08	28.3	1426.5	107.6	0.0637	0.0632	0.0627	0.0622
435/55	13.0	437	56.6	494	54	7	3.21	3.21	9.63	28.9	1583.7	140.1	0.0634	0.0629	0.0624	0.0619
490/35	6.9	492	34.1	526	45	7	3.73	2.49	7.47	29.9	1584.4	119.6	0.0574	0.0570	0.0565	0.0561
485/60	13.0	485	62.8	547	54	7	3.38	3.38	10.1	30.4	1755.9	154.1	0.0572	0.0567	0.0563	0.0559
550/40	6.9	551	38.0	589	45	7	3.95	2.63	7.89	31.6	1775.5	133.9	0.0512	0.0508	0.0504	0.0500
545/70	12.7	544	69.0	613	54	19	3.58	2.15	10.8	32.2	1961.6	169.7	0.0510	0.0506	0.0502	0.0498
620/40	6.9	620	42.8	663	45	7	4.19	2.79	8.37	33.5	1997.8	150.6	0.0455	0.0451	0.0448	0.0444
610/75	12.7	609	77.6	687	54	19	3.79	2.28	11.4	34.1	2200.2	190.6	0.0455	0.0452	0.0448	0.0445
630/45	6.9	623	43.1	667	45	7	4.20	2.80	8.40	33.6	2008.0	151.5	0.0453	0.0449	0.0446	0.0442
630/55	8.8	640	56.3	696	48	7	4.12	3.20	9.60	34.3	2141.0	169.9	0.0438	0.0435	0.0432	0.0428
700/50	6.9	697	48.2	745	45	7	4.44	2.96	8.88	35.5	2244.1	169.3	0.0405	0.0402	0.0399	0.0396
700/85	12.7	689	87.4	776	54	19	4.03	2.42	12.1	36.3	2485.6	215.1	0.0403	0.0399	0.0396	0.0393
720/50	6.9	725	50.1	775	45	7	4.53	3.02	9.06	36.2	2236.0	176.2	0.0389	0.0387	0.0383	0.0380
790/35	4.3	791	34.1	825	72	7	3.74	2.49	7.47	37.4	2413.2	159.1	0.0360	0.0357	0.0355	0.0352
785/65	8.3	785	65.4	851	84	7	3.45	3.45	10.4	38.0	2606.6	196.4	0.0358	0.0356	0.0353	0.0350
775/100	12.7	777	98.6	875	54	19	4.28	2.57	12.9	38.5	2803.4	242.6	0.0357	0.0354	0.0351	0.0349

续表

标称截面铝/铝包钢	钢比（%）	计算面积（mm²）			单线根数 n		单线直径（mm）		直径（mm）		单位长度质量（kg/km）	额定拉断力（kN）	20℃直流电阻（Ω/km）			
		铝	铝包钢	总和	铝	铝包钢	铝	铝包钢	铝包钢芯	绞线			JL/LB20A	JL1/LB20A	JL2/LB20A	JL3/LB20A
800/55	6.9	814	56.3	871	45	7	4.80	3.20	9.60	38.4	2622.7	197.8	0.0347	0.0344	0.0341	0.0339
800/70	8.8	808	71.3	879	48	7	4.63	3.60	10.8	38.6	2704.9	210.5	0.0347	0.0344	00342	0.0339
800/100	12.7	795	101	896	54	19	4.33	2.60	13.0	39.0	2869.3	248.3	0.0349	0.0346	0.0343	0.0341
880/75	8.3	884	73.6	957	84	7	3.66	3.66	11.0	40.3	2933.5	211.3	0.0318	0.0316	0.0313	0.0311
890/115	12.7	890	113	1002	54	19	4.58	2.75	13.8	41.2	3210.1	277.8	0.0312	0.0309	0.0307	0.0305
900/40	4.3	900	38.9	939	72	7	3.99	2.66	7.98	39.9	2747.3	181.2	0.0317	0.0314	0.0312	0.0309
900/75	8.3	898	74.9	973	84	7	3.69	3.69	11.1	40.6	2981.8	214.8	0.0313	0.0311	0.0308	0.0306
990/45	4.3	988	42.8	1031	72	7	4.18	2.79	8.37	41.8	3015.9	199.0	0.0288	0.0286	0.0284	0.0282
1025/45	4.3	1021	44.3	1066	72	7	4.25	2.84	8.52	42.5	3118.4	205.8	0.0279	0.0277	0.0275	0.0272
1135/50	4.3	1135	49.2	1184	72	7	4.48	2.99	8.97	44.8	3464.3	228.5	0.0251	0.0249	00247	0.0245
1100/90	8.2	1098	89.6	1188	84	19	4.08	2.45	12.3	44.9	3634.6	269.0	0.0256	0.0254	0.0252	0.0250
1235/50	4.2	1239	52.2	1291	72	19	4.68	1.87	9.35	46.8	3772.0	247.7	0.0230	0.0228	0.0227	0.0225
1225/100	8.2	1226	100	1326	84	19	4.31	2.59	13.0	47.4	4056.9	300.4	0.0230	0.0228	0.0226	0.0224
1270/105	8.1	1271	103	1375	84	19	4.39	2.63	13.2	48.3	4204.6	310.9	0.0222	0.0220	00218	0.0216
1420/60	4.2	1419	60.3	1480	72	19	5.01	2.01	10.1	50.1	4325.9	284.5	0.0201	0.0199	0.0198	0.0196
1435/60	4.2	1436	60.3	1499	72	19	5.04	2.01	10.1	50.4	4373.1	287.1	0.0199	0.0197	0.0195	0.0194
1405/115	8.1	1408	114	1523	84	19	4.62	2.77	13.9	50.8	4658.0	344.6	0.0200	00198	00197	0.0195

B.7 铝包钢芯铝合金绞线

铝包钢芯铝合金绞线标准见表 B-11、表 B-12，摘自 GB/T 1179—2017。

表 B-11　　JLHA1/LB14、JLHA2/LB14 铝包钢芯铝合金绞线规格

标称截面铝合金/铝包钢	钢比（%）	计算面积（mm²）			单线根数 n		单线直径（mm）		直径（mm）		单位长度质量（kg/km）	额定拉断力（kN）		20℃直流电阻（Ω/km）	
		铝合金	铝包钢	总和	铝合金	铝包钢	铝合金	铝包钢	铝包钢芯	绞线		JLHA1/LB14	JLHA2/LB14	JLHA1/LB14	JLHA2/LB14
25/4	16.7	24.1	4.01	28.1	6	1	2.26	2.26	2.26	6.78	94.7	13.48	12.76	1.3254	1.3134
40/5	6.9	38.3	6.38	44.7	6	1	2.85	2.85	2.85	8.55	150.6	21.43	20.29	0.8334	0.8259
50/8	8.8	48.3	8.04	56.3	6	1	3.20	3.20	3.20	9.60	189.8	26.78	25.33	0.6611	0.6551
60/10	12.7	60.4	10.1	70.5	6	1	3.58	3.58	3.58	10.7	237.6	32.51	31.31	0.5282	0.5234
70/10	8.3	68.0	11.3	79.3	6	1	3.80	3.80	3.80	11.4	267.7	36.63	35.27	0.4688	0.4646
70/40	12.7	69.7	40.7	110	12	7	2.72	2.72	8.16	13.6	484.2	80.01	77.92	0.4154	0.4121
95/15	4.3	95.9	16.0	112	6	1	4.51	4.51	4.51	13.5	377.1	51.60	49.68	0.3328	0.3298
95/55	4.3	98.5	56.3	153	12	7	3.20	3.20	9.60	16.0	670.2	109.1	106.2	0.3002	0.2977
120/7	4.3	119	6.61	125	18	1	2.90	2.90	2.90	14.5	374.6	47.95	44.39	0.2773	0.2747
120/70	4.3	122	71.3	193	12	7	3.60	3.60	10.8	18.0	848.2	134.0	131.5	0.2372	0.2352
150/8	8.2	145	8.04	153	18	1	3.20	3.20	3.20	16.0	456.2	58.15	53.80	0.2277	0.2256
150/35	8.1	147	34.4	182	30	7	2.50	2.50	7.50	17.5	653.3	96.31	91.89	0.2144	0.2125
185/10	4.2	183	10.2	193	18	1	3.60	3.60	3.60	18.0	577.3	71.35	67.69	0.1799	0.1783
185/25	8.1	187	24.2	211	24	7	3.15	2.10	6.30	18.9	689.9	94.97	89.36	0.1732	0.1716
185/30	16.3	181	29.6	211	26	7	2.98	2.32	6.96	18.9	712.9	100.7	95.22	0.1772	0.1756

续表

标称截面铝合金/铝包钢	钢比(%)	计算面积(mm²)			单线根数 n		单线直径(mm)		直径(mm)		单位长度质量(kg/km)	额定拉断力(kN)		20℃直流电阻(Ω/km)	
		铝合金	铝包钢	总和	铝合金	铝包钢	铝合金	铝包钢	铝包钢芯	绞线		JLHA1/LB14	JLHA2/LB14	JLHA1/LB14	JLHA2/LB14
185/45	23.3	185	43.1	228	30	7	2.80	2.80	8.40	19.6	819.5	120.8	115.3	0.1709	0.1694
200/10	5.6	198	11.0	209	18	1	3.74	3.74	3.74	18.7	623.1	77.01	73.06	0.1667	0.1652
200/30	16.3	192	31.4	224	26	7	3.07	2.39	7.17	19.5	756.6	106.8	101.1	0.1669	0.1654
210/10	5.6	204	11.3	215	18	1	3.80	3.80	3.80	19.0	643.3	79.50	75.42	0.1615	0.1600
210/35	16.2	212	34.4	246	26	7	3.22	2.50	7.50	20.4	831.1	117.3	110.9	0.1518	0.1504
210/50	23.3	209	48.8	258	30	7	2.98	2.98	8.94	20.9	928.3	136.8	130.6	0.1509	0.1496
240/30	13.0	244	31.7	276	24	7	3.60	2.40	7.20	21.6	901.1	121.6	116.7	0.1326	0.1314
240/40	16.3	239	38.9	278	26	7	3.42	2.66	7.98	21.7	938.5	132.5	125.3	0.1345	0.1333
240/55	23.3	241	56.3	298	30	7	3.20	3.20	9.60	22.4	1070.4	156.1	148.9	0.1309	0.1297
250/40	16.3	240	39.2	279	26	7	3.43	2.67	8.01	21.7	944.4	133.3	126.1	0.1337	0.1325
300/40	13.0	300	38.9	339	24	7	3.99	2.66	7.98	23.9	1106.9	149.4	143.4	01079	0.1069
300/50	16.3	300	48.8	348	26	7	3.83	2.08	8.94	24.3	1177.2	163.2	157.2	0.1073	0.1063
300/70	23.3	305	71.3	377	30	7	3.60	3.60	10.8	25.2	1354.7	191.7	185.6	0.1034	0.1025
385/50	13.0	387	50.1	437	54	7	3.02	3.02	9.06	27.2	1429.5	194.9	183.3	0.0839	0.0832
400/35	8.8	391	34.4	425	48	7	3.22	2.50	7.50	26.8	1326.6	175.5	163.8	0.0839	0.0831
400/50	13.0	400	51.8	452	54	7	3.07	3.07	9.21	27.6	1477.2	201.4	189.4	0.0812	0.0805
400/65	16.3	399	65.1	464	26	7	4.42	3.44	10.3	28.0	1568.1	215.4	207.5	0.0805	0.0798
400/95	22.9	408	93.3	501	30	19	4.16	2.50	12.5	29.1	1797.8	259.9	251.8	0.0775	0.0768
440/30	6.9	443	30.6	474	45	7	3.54	2.36	7.08	28.3	1443.4	182.7	173.8	0.0744	0.0737
435/35	13.0	437	56.6	494	54	7	3.21	3.21	9.63	28.9	1615.0	220.2	207.1	0.0743	0.0736
490/35	6.9	492	34.1	526	45	7	3.73	2.49	7.47	29.9	1603.2	203.0	193.1	0.0670	0.0664
485/60	13.0	485	62.8	547	54	7	3.38	3.38	10.1	30.4	1790.6	244.1	229.6	0.0670	0.0664
550/40	6.9	551	38.0	589	45	7	3.95	2.63	7.89	31.6	1796.5	227.3	216.3	0.0598	0.0592
620/40	6.9	620	42.8	663	45	7	4.19	2.79	8.37	33.5	2021.4	255.8	243.4	0.0531	0.0526
610/75	12.7	609	77.6	687	54	19	3.79	2.28	11.4	34.1	2243.2	301.3	289.1	0.0533	0.0528
630/45	6.9	623	43.1	667	45	7	4.20	2.80	8.40	33.6	2031.8	257.2	244.7	0.0529	0.0524
630/55	8.8	640	56.3	696	48	7	4.12	3.20	9.60	34.3	2172.1	279.3	266.5	0.0512	0.0508
700/50	6.9	697	48.2	745	45	7	4.44	2.96	8.88	35.5	2270.7	287.4	273.5	0.0473	0.0469
720/50	6.9	725	50.1	775	45	7	4.53	3.02	9.06	36.2	2365.6	297.7	283.2	0.0455	0.0451
700/85	12.7	689	87.4	776	54	19	4.03	2.42	12.1	36.3	2534.0	340.2	326.4	0.0472	0.0467
790/35	4.3	791	34.1	825	72	7	3.74	2.49	7.47	37.4	2432.0	282.4	267.3	0.0420	0.0416
785/65	8.3	785	65.4	851	84	7	3.45	3.45	10.4	38.0	2642.7	328.2	305.9	0.0419	0.0415
775/100	12.7	777	98.6	875	54	19	4.28	2.57	12.9	38.5	2858.1	383.7	368.2	0.0418	0.0414
800/55	6.9	814	56.3	871	45	7	4.80	3.20	9.60	38.4	2653.8	334.2	317.9	0.0405	0.0401
800/70	8.8	808	71.3	879	48	7	4.63	3.60	10.8	38.6	2744.3	350.0	333.9	0.0406	0.0402
800/100	12.7	795	101	896	54	19	4.33	2.60	13.0	39.0	2925.2	392.7	376.8	0.0409	0.0405
880/75	8.3	884	73.6	957	84	7	3.66	3.66	11.0	40.3	2974.2	358.2	341.4	0.0372	0.0369
890/115	12.7	890	113	1002	54	19	4.58	2.75	13.8	41.2	3274.4	439.4	421.6	0.0365	0.0362
900/40	4.3	891	38.6	930	72	7	3.97	2.65	7.95	39.7	2743.7	318.4	301.5	0.0373	0.0369
900/75	8.3	898	74.9	973	84	7	3.69	3.69	11.1	40.6	3023.2	364.1	347.0	0.0366	0.0363
990/45	4.3	988	42.8	1031	72	7	4.18	2.79	8.37	41.8	3041.6	353.0	334.2	0.0336	0.0333
1025/45	4.3	1021	44.3	1066	72	7	4.25	2.84	8.52	42.5	3145.1	365.1	345.6	0.0325	0.0322
1015/85	8.3	1014	84.5	1098	84	7	3.92	3.92	11.8	43.1	3411.8	410.9	391.7	0.0324	0.0321
1140/50	4.3	1135	49.2	1184	72	7	4.48	2.99	8.97	44.8	3491.4	405.5	383.9	0.0293	0.0290
1100/90	8.2	1098	89.6	1188	84	19	4.08	2.45	12.3	44.9	3684.2	448.6	427.8	0.0300	0.0297
1225/100	8.2	1226	100	1326	84	19	4.31	2.59	13.0	47.4	4112.3	500.8	477.5	0.0268	0.0266
1270/105	8.1	1271	103	1375	84	19	4.39	2.63	13.2	48.3	4406.5	110.6	483.3	0.0231	0.0229
1405/115	8.1	1408	114	1523	84	19	4.62	2.77	13.9	50.8	4721.4	574.8	548.0	0.0234	0.0232

表 B-12　　**JLHA1/LB20A、JLHA2/LB20A 铝包钢芯铝合金绞线规格**

标称截面 铝合金/铝包钢	钢比 (%)	计算面积 (mm^2)			单线根数 n		单线直径 (mm)		直径 (mm)		单位长度质量 (kg/km)	额定拉断力 (kN)		20℃直流电阻 (Ω/km)	
		铝合金	铝包钢	总和	铝合金	铝包钢	铝合金	铝包钢	铝包钢芯	绞线		JLHA1/LB20A	JLHA2/LB20A	JLHA1/LB20A	JLHA2/LB20A
15/3	16.7	15.4	2.57	18.0	6	1	1.81	1.81	1.81	5.43	59.3	8.11	7.64	2.0267	2.0088
24/4	16.7	24.1	4.01	28.1	6	1	2.26	2.26	2.26	6.78	92.5	12.64	11.91	1.3000	1.2884
38/5	16.7	38.3	6.38	44.7	6	1	2.85	2.85	2.85	8.55	147.1	20.10	18.95	0.8174	0.8102
50/8	16.7	48.3	8.04	56.3	6	1	3.20	3.20	3.20	9.60	185.4	25.33	23.89	0.6484	0.6427
60/10	16.7	60.4	10.1	70.5	6	1	3.58	3.58	3.58	10.7	232.1	30.50	29.29	0.5181	0.5135
70/10	16.7	68.0	11.3	79.4	6	1	3.80	3.80	3.80	11.4	261.5	33.91	32.55	0.4598	0.4557
70/40	58.3	69.7	40.7	110	12	7	2.72	2.72	8.16	13.6	461.8	71.47	60.38	03913	0.3883
95/15	16.7	95.9	16.0	112	6	1	4.51	4.51	4.51	13.5	368.3	46.65	44.73	0.3264	0.3235
95/20	19.8	95.1	18.8	114	7	7	4.16	1.85	5.55	13.9	386.0	52.55	50.65	0.3257	0.3228
95/55	58.3	96.5	56.3	153	12	7	3.20	3.20	9.60	16.0	639.1	98.92	96.03	0.2827	0.2805
120/7	6.6	119	6.61	125	18	1	2.90	2.90	2.90	14.5	371.0	46.57	43.00	0.2754	0.2729
120/20	16.3	121	19.6	140	26	7	2.43	1.89	5.67	15.4	462.9	62.75	59.14	0.2615	0.2591
120/25	19.8	122	24.2	147	7	7	4.72	2.10	6.30	15.7	497.1	67.68	65.23	0.2530	0.2507
120/70	58.3	122	71.3	193	12	7	3.60	3.60	10.8	18.0	808.9	119.7	117.3	0.2234	0.2216
150/8	5.6	145	8.04	153	18	1	3.20	3.20	3.20	16.0	451.7	56.70	52.36	0.2262	0.2241
150/20	12.9	146	18.8	164	24	7	2.78	1.85	5.55	16.7	526.5	69.92	65.55	0.2190	0.2170
150/25	16.3	149	24.2	173	26	7	2.70	2.10	6.30	17.1	571.5	77.48	73.01	0.2118	0.2099
150/35	23.3	147	34.4	182	30	7	2.50	2.50	7.50	17.5	634.3	89.09	84.68	0.2088	0.2070
150/25	16.3	153	24.9	178	26	7	2.74	2.13	6.39	17.4	588.4	79.76	75.16	0.2057	0.2038
185/10	5.6	183	10.2	193	18	1	3.60	3.60	3.60	18.0	571.7	69.32	65.65	0.1787	0.1771
185/25	13.0	187	24.2	211	24	7	3.15	2.10	6.30	18.9	676.5	89.88	84.27	0.1705	0.1690
185/30	16.3	181	29.6	211	26	7	2.98	2.32	6.96	18.9	696.6	94.45	89.01	0.1738	0.1723
185/45	23.3	185	43.1	228	30	7	2.80	2.80	8.40	19.6	795.7	111.8	106.2	0.1664	0.1650
200/10	5.6	198	11.0	209	18	1	3.74	3.74	3.74	18.7	617.1	74.37	70.42	0.1656	0.1641
200/30	16.3	192	31.4	224	26	7	3.07	2.39	7.17	19.5	739.3	100.2	94.46	0.1638	0.1623
210/10	5.6	204	11.3	215	18	1	3.80	3.80	3.80	19.0	637.0	76.78	72.70	0.1604	0.1589
210/25	13.0	209	27.1	236	24	7	3.33	2.22	6.66	20.0	756.1	100.4	94.18	0.1526	0.1512
210/35	16.2	212	34.4	246	26	7	3.22	2.50	7.50	20.4	812.1	110.0	103.7	0.1489	0.1476
210/50	23.3	209	48.8	258	30	7	2.98	2.98	8.94	20.9	901.3	126.6	120.3	0.1469	0.1457
240/30	13.0	244	31.7	276	24	7	3.60	2.40	7.20	21.6	883.6	115.0	110.1	0.1306	0.1294
240/40	16.3	239	38.9	278	26	7	3.42	2.66	7.98	21.7	917.0	124.3	117.1	0.1320	0.1308
240/55	23.3	241	56.3	298	30	7	3.20	3.20	9.60	22.4	1039.3	146.0	138.7	0.1274	0.1263
250/25	9.8	244	24.0	268	22	7	3.76	2.09	6.27	21.3	832.7	105.8	100.9	0.1321	0.1309
250/40	16.3	240	39.2	279	26	7	3.43	2.67	8.01	21.7	922.8	125.1	117.9	0.1312	0.1301
300/15	5.2	297	15.3	312	42	7	3.00	1.67	5.01	23.0	921.8	114.9	106.0	0.1108	0.1098
300/20	6.9	303	20.9	324	45	7	2.93	1.95	5.85	23.4	976.8	123.7	114.6	0.1077	0.1067
300/25	8.8	306	27.1	333	48	7	2.85	2.22	6.66	23.8	1025.6	132.0	122.8	0.1060	0.1050
300/40	13.0	300	38.9	339	24	7	3.99	2.66	7.98	23.9	1085.5	141.2	135.2	0.1063	0.1053
300/50	16.3	300	48.8	348	26	7	3.83	2.98	8.94	24.3	1150.3	152.9	147.0	0.1052	0.1043
300/70	23.3	305	71.3	377	30	7	3.60	3.60	10.8	25.2	1315.4	177.4	171.3	0.1007	0.0998
310/20	6.9	310	21.3	331	45	7	2.96	1.97	5.91	23.7	996.9	126.2	117.0	0.1055	0.1046
395/25	6.9	394	27.1	421	45	7	3.34	2.22	6.66	26.7	1268.8	160.7	148.8	0.0829	0.0821
387/50	13.0	387	50.1	437	54	7	3.02	3.02	9.06	27.2	1401.8	185.9	174.3	0.0827	0.0819
400/20	5.1	406	20.9	427	42	7	3.51	1.95	5.85	26.9	1261.4	153.1	145.0	0.0810	0.0802
400/25	6.9	392	27.1	419	45	7	3.33	2.22	6.66	26.6	1262.3	159.9	148.1	0.0834	0.0826
400/35	8.8	391	34.4	425	48	7	3.22	2.50	7.50	26.8	1307.6	168.3	156.5	0.0830	0.0823
400/50	13.0	400	51.8	452	54	7	3.07	3.07	9.21	27.6	1448.6	192.1	180.1	0.0800	0.0793
400/65	16.3	399	65.1	464	26	7	4.42	3.44	10.3	28.0	1532.2	202.4	194.5	0.0790	0.0783
400/95	22.0	408	93.3	501	30	19	4.16	2.50	12.5	29.1	1746.1	240.4	232.2	0.0755	0.0749
440/30	6.9	443	30.6	474	45	7	3.54	2.36	7.08	28.3	1426.5	176.3	167.4	0.0738	0.0731

续表

标称截面铝合金/铝包钢	钢比（%）	计算面积（mm^2）			单线根数 n		单线直径（mm）		直径（mm）		单位长度质量（kg/km）	额定拉断力（kN）		20℃直流电阻（Ω/km）	
		铝合金	铝包钢	总和	铝合金	铝包钢	铝合金	铝包钢	铝包钢芯	绞线		JLHA1/LB20A	JLHA2/LB20A	JLHA1/LB20A	JLHA2/LB20A
435/55	13.0	437	56.6	494	51	7	3.21	3.21	9.63	28.9	1583.7	210.0	196.9	0.0732	0.0725
490/35	6.9	492	34.1	526	45	7	3.73	2.49	7.47	29.9	1584.4	195.8	186.0	0.0665	0.0658
485/60	13.0	485	62.8	547	54	7	3.38	3.38	10.1	30.4	1755.9	231.6	217.0	0.0660	0.0654
550/40	6.9	551	38.0	589	45	7	3.95	2.63	7.89	31.6	1775.5	219.3	208.3	0.0593	0.0587
545/70	12.7	544	69.0	613	54	19	3.58	2.15	10.8	32.2	1961.6	254.0	243.1	0.0589	0.0584
620/40	6.9	620	42.8	663	45	7	4.19	2.79	8.37	33.5	1997.8	246.8	234.4	0.0527	0.0522
610/75	12.7	609	77.6	687	54	19	3.79	2.28	11.4	34.1	2200.2	285.0	272.8	0.0525	0.0521
630/45	6.9	623	43.1	667	45	7	4.20	2.80	8.40	33.6	2008.0	248.1	235.6	0.0524	0.0519
630/55	8.8	640	56.3	696	48	7	4.12	3.20	9.60	34.3	2141.0	269.1	256.3	0.0507	0.0502
700/50	6.9	697	48.2	745	45	7	4.44	2.96	8.88	35.5	2244.1	277.3	263.3	0.0469	0.0465
720/50	6.9	725	50.1	775	45	7	4.53	3.02	9.06	36.2	2336.0	288.6	274.1	0.0451	0.0446
700/85	12.7	689	87.4	776	54	19	4.03	2.42	12.1	36.3	2485.6	321.8	308.1	0.0465	0.0461
790/35	4.3	791	34.1	825	72	7	3.74	2.49	7.47	37.4	2413.2	275.6	260.5	0.0418	0.0414
785/65	8.3	785	65.4	851	84	7	3.45	3.45	10.4	38.0	2606.6	315.8	293.4	0.0415	0.0411
775/100	12.7	777	98.6	875	54	19	4.28	2.57	12.9	38.5	2803.4	363.0	347.5	0.0412	0.0408
800/55	6.9	814	56.3	871	45	7	4.80	3.20	9.60	38.4	2622.7	324.1	307.8	0.0401	0.0398
800/70	8.8	808	71.3	879	48	7	4.63	3.60	10.8	38.6	2704.9	335.8	319.6	0.0402	0.0598
800/100	12.7	795	101	896	54	19	4.33	2.60	13.0	39.0	2869.3	371.5	355.6	0.0403	0.0399
880/75	8.3	884	73.6	957	84	7	3.66	3.66	11.0	40.3	2933.5	341.4	324.6	0.0368	0.0365
890/115	12.7	890	113	1002	54	19	4.58	2.75	13.8	41.2	3210.1	415.7	397.9	0.0360	0.0357
900/40	4.3	891	38.6	930	72	7	3.97	2.65	7.95	39.7	2720.5	310.7	293.8	0.0371	0.0367
900/75	8.3	898	74.9	973	84	7	3.69	3.69	1.11	40.6	2981.8	347.0	330.0	0.0362	0.0359
990/45	4.3	988	42.8	1031	72	7	4.18	2.79	8.37	41.8	3015.9	344.5	325.7	0.0334	0.0331
1025/45	4.3	1021	44.3	1066	72	7	4.25	2.84	8.52	42.5	3118.4	356.2	336.8	0.0323	0.0320
1015/85	8.3	1014	84.5	1098	84	7	3.92	3.92	11.8	43.1	3365.1	391.7	372.4	0.0321	0.0318
1110/45	4.2	1110	46.8	1157	72	19	4.43	1.77	8.85	44.3	3379.7	385.4	364.3	0.0298	0.0295
1140/50	4.3	1135	49.2	1184	72	7	4.48	2.99	8.97	44.8	3464.3	395.7	374.1	0.0291	0.0288
1100/90	8.2	1098	89.6	1188	84	19	4.08	2.45	12.3	44.9	3634.6	430.8	409.9	0.0297	0.0294
1235/50	4.2	1239	52.2	1291	72	19	4.68	1.87	9.35	46.8	3772.0	430.1	406.6	0.0267	0.0264
1225/100	8.2	1226	100	1326	84	19	4.31	2.59	13.0	47.4	4056.9	480.9	457.6	0.0266	0.0263
1270/105	8.1	1271	103	1375	84	19	4.39	2.63	13.2	48.3	4204.6	498.1	474.0	0.0256	0.0254
1420/60	4.2	1419	60.3	1480	72	19	5.01	2.01	10.1	50.1	4325.9	493.5	466.5	0.0233	0.0231
1435/60	4.2	1436	60.3	1497	72	19	5.04	2.01	10.1	50.4	4373.1	498.6	471.3	0.0230	0.0228
1405/115	8.1	1408	114	1523	84	19	4.62	2.77	13.9	50.8	4658.0	551.9	525.2	0.0231	0.0229

B.8 地线

钢绞线及铝包钢绞线标准见表 B-13～表 B-15，摘自 GB/T 1179—2017。

表 B-13　　　JG1A、JG2A、JG3A、JG4A、JG5A 钢绞线规格

标称截面（mm^2）	单线根数 n	计算面积（mm^2）	直径（mm）		单位长度质量（kg/km）	额定拉断力（kN）					20℃直流电阻（Ω/km）
			单线	绞线		JG1A	JG2A	JG3A	JG4A	JG5A	
10	7	10.8	1.40	4.20	84.8	14.44	15.62	17.46	20.15	21.12	17.9754
15	7	17.8	1.80	5.40	140.1	23.87	25.83	28.86	33.31	34.91	10.8740
20	7	22.0	2.00	6.00	173.0	29.47	31.89	35.63	41.12	43.10	8.8079
25	7	26.6	2.20	6.60	209.3	35.66	38.58	43.11	49.76	52.15	7.2793
35	7	37.2	2.60	7.80	292.4	48.69	52.40	59.09	67.64	70.99	5.2118

续表

标称截面（mm²）	单线根数 n	计算面积（mm²）	直径（mm）		单位长度质量（kg/km）	额定拉断力（kN）					20℃直流电阻（Ω/km）
			单线	绞线		JG1A	JG2A	JG3A	JG4A	JG5A	
40	19	38.2	1.60	8.00	301.9	51.19	55.39	61.89	71.44	74.89	5.0939
50	7	49.5	3.00	9.00	389.2	64.82	69.77	78.67	90.05	94.51	3.9146
50	19	48.3	1.80	9.00	382.1	64.79	70.11	78.33	90.41	94.76	4.0248
55	7	56.3	3.20	9.60	442.9	72.62	79.38	87.26	99.65	105.3	3.4406
60	19	59.7	2.00	10.0	471.7	79.98	86.55	96.70	111.6	117.0	3.2601
65	7	67.3	3.50	10.5	529.8	86.88	94.96	104.4	119.2	125.9	2.8761
70	19	72.2	2.20	11.0	570.8	96.78	104.73	117.00	135.1	141.6	2.6943
75	37	74.4	1.60	11.2	589.4	99.7	107.9	120.5	139.1	145.8	2.6225
80	7	79.4	3.80	11.4	624.5	102.4	109.6	120.7	136.5	144.5	2.4399
80	19	78.9	2.30	11.5	623.9	103.4	111.3	125.5	143.7	150.8	2.4651
90	7	88.0	4.00	12.0	692.0	113.5	121.4	133.7	151.3	160.1	2.2020
95	19	94.8	2.52	12.6	748.9	124.14	133.62	150.68	172.5	181.0	2.0535
100	19	101	2.60	13.0	797.2	132.1	142.2	160.4	183.6	192.7	1.9291
115	37	116	2.00	14.0	921.0	155.8	168.5	188.3	217.4	227.8	1.6784
125	19	125	2.90	14.5	991.8	164.4	177.0	199.5	228.4	239.7	1.5506
150	19	153	3.20	16.0	1207.6	197.1	215.5	236.9	270.5	285.7	1.2735
155	37	154	2.30	16.1	1218.0	201.4	216.8	244.4	279.8	293.6	1.2691
185	19	183	3.50	17.5	1444.7	235.8	257.8	283.3	323.6	341.8	1.0645
200	37	196	2.60	18.2	1556.5	257.3	277.0	312.3	357.5	375.2	0.9931
240	19	239	4.00	20.0	1886.9	308.0	329.5	362.9	410.7	434.5	0.8150
245	37	244	2.90	20.3	1936.4	320.2	344.5	388.6	444.8	466.8	0.7983
300	37	298	3.20	22.4	2357.7	383.9	419.6	461.2	526.7	556.5	0.6556
355	37	356	3.50	24.5	2820.5	459.2	501.9	551.8	630.1	665.7	0.5480
465	37	465	4.00	28.0	3683.9	599.8	641.6	706.7	799.7	846.2	0.4196

表 B-14　　JLB14、JLB20A 铝包钢绞线规格

标称截面（mm²）	计算面积（mm²）	单线根数 n	直径（mm）		单位长度质量（kg/km）		额定拉断力（kN）		20℃直流电阻（Ω/km）	
			单线	绞线	JLB14	JLB20A	JLB14	JLB20A	JLB14	JLB20A
30	29.1	7	2.30	6.90	210.4	194.2	46.24	38.97	4.2899	2.9540
35	34.1	7	2.50	7.50	248.6	229.4	54.63	46.04	3.6309	2.5002
40	41.6	7	2.75	8.25	300.7	277.6	66.11	55.71	3.0008	2.0663
45	46.2	7	2.90	8.70	334.5	308.7	73.52	61.96	2.6984	1.8581
50	49.5	7	3.00	9.00	357.9	330.3	78.67	66.30	2.5215	1.7363
55	56.3	7	3.20	9.60	407.2	375.9	87.26	75.44	2.2161	1.5260
65	67.3	7	3.50	10.5	487.2	449.6	104.4	85.53	1.8525	1.2756
70	71.3	7	3.60	10.8	515.4	475.7	108.3	90.49	1.7510	1.2057
80	79.4	7	3.80	11.4	574.3	530.0	120.7	99.24	1.5716	1.0822
90	90.2	7	4.05	12.2	652.3	602.1	137.1	109.1	1.3835	0.9527
95	95.1	7	4.16	12.5	688.2	635.2	144.6	112.3	1.3113	0.9030
80	80.3	19	2.32	11.6	583.8	538.8	127.7	107.6	1.5609	1.0748
100	101	19	2.60	13.0	733.2	676.7	160.4	135.2	1.2428	0.8558
120	121	19	2.85	14.3	881.0	813.1	192.7	162.4	1.0343	0.7122
150	148	19	3.15	15.8	1076.2	993.3	229.5	198.4	0.8467	0.5830
170	173	19	3.40	17.0	1253.9	1157.3	267.4	226.0	0.7267	0.5004
185	183	19	3.50	17.5	1328.7	1226.3	283.3	232.2	0.6858	0.4722
210	210	19	3.75	18.8	1525.3	1407.8	319.0	262.3	0.5974	0.4114
240	239	19	4.00	20.0	1735.4	1601.8	362.9	288.9	0.5251	0.3616
300	298	37	3.20	22.4	2168.0	2001.0	461.2	398.7	0.4223	0.2908

续表

标称截面（mm²）	计算面积（mm²）	单线根数 n	直径（mm）		单位长度质量（kg/km）		额定拉断力（kN）		20℃直流电阻（Ω/km）	
			单线	绞线	JLB14	JLB20A	JLB14	JLB20A	JLB14	JLB20A
350	352	37	3.48	24.4	2564.0	2366.5	545.5	446.9	0.3571	0.2459
380	377	37	3.60	25.2	2743.9	2532.5	572.5	478.3	0.3337	0.2298
400	398	37	3.70	25.9	2898.4	2675.2	604.7	497.3	0.3159	0.2175
420	420	37	3.80	26.6	3057.2	2821.7	637.8	524.5	0.2995	0.2062
450	451	37	3.94	27.6	3286.6	3033.5	685.7	563.9	0.2786	0.1918
465	465	37	4.00	28.0	3387.5	3126.6	706.7	562.6	0.2703	0.1861
500	503	37	4.16	29.1	3663.9	3381.7	764.4	593.4	0.2499	0.1721
590	588	37	4.50	31.5	4287.3	3957.1	894.5	670.8	0.2135	0.1470
600	599	37	4.54	31.8	4363.9	4027.1	910.4	682.8	0.2098	0.1445
600	600	61	3.54	31.9	4380.6	4043.2	866.9	724.4	0.2096	0.1443
630	631	61	3.63	32.7	4606.2	4251.3	911.6	761.7	0.1993	0.1373
670	670	37	4.80	33.6	4878.0	4502.3	1004.3	716.4	0.1877	0.1292
800	805	61	4.10	36.9	5876.2	5423.5	1162.9	925.8	0.1563	0.1076

表 B-15　JLB27、JLB35、JLB40 铝包钢绞线规格

标称截面（mm²）	计算面积（mm²）	单线根数 n	直径（mm）		单位长度质量（kg/km）			额定拉断力（kN）			20℃直流电阻（Ω/km）		
			单线	绞线	JLB27	JLB35	JLB40	JLB27	JLB35	JLB40	JLB27	JLB35	JLB40
35	34.4	7	2.50	7.50	205.7	179.3	161.5	37.11	27.83	23.37	1.8828	1.4524	1.2708
40	41.6	7	2.75	8.25	248.9	216.9	195.4	44.90	33.68	28.27	1.5561	1.2003	1.0502
45	46.2	7	2.90	8.70	276.8	241.2	217.3	49.94	37.45	31.44	1.3993	1.0794	0.9444
50	49.5	7	3.00	9.00	296.3	258.2	232.6	53.44	40.08	33.65	1.3075	1.0086	0.8825
55	56.3	7	3.20	9.60	337.1	293.7	264.6	60.80	45.60	38.28	1.1492	0.8865	0.7756
65	67.3	7	3.50	10.5	403.2	351.4	316.6	72.74	54.55	45.80	0.9606	0.7410	0.6483
70	71.3	7	3.60	10.8	426.6	371.8	334.9	76.95	57.71	48.45	0.9080	0.7004	0.6128
80	79.4	7	3.80	11.4	475.3	414.2	373.2	85.74	64.30	53.98	0.8149	0.6286	0.5500
90	90.2	7	4.05	12.2	539.9	470.5	423.9	97.39	73.04	61.32	0.7174	0.5534	0.4842
95	95.1	7	4.16	12.5	569.7	496.4	447.2	102.8	77.07	64.70	0.6800	0.5245	0.4589
100	101	19	2.60	13.0	606.9	528.9	476.5	108.9	81.71	68.60	0.6444	0.4971	0.4349
120	121	19	2.85	14.3	729.2	635.5	572.5	130.9	98.18	82.42	0.5363	0.4137	0.3620
150	148	19	3.15	15.8	890.8	776.3	699.4	159.9	119.9	100.7	0.4390	0.3387	0.2963
170	173	19	3.40	17.0	1037.9	904.4	814.8	186.3	139.7	117.3	0.3769	0.2907	0.2543
185	183	19	3.50	17.5	1099.8	958.4	863.5	197.4	148.1	124.3	0.3556	0.2743	0.2400
210	210	19	3.75	18.8	1262.5	1100.2	991.2	226.6	170.0	142.7	0.3098	0.2390	0.2091
240	239	19	4.00	20.0	1436.5	1251.8	1127.8	257.9	193.4	162.4	0.2723	0.2100	0.1838
300	298	37	3.20	22.4	1794.5	1563.8	1408.9	321.4	241.0	202.3	0.2190	0.1689	0.1478
350	352	37	3.48	24.4	2122.3	1849.4	1666.2	381.0	285.1	239.3	0.1852	0.1428	0.1250
380	377	37	3.60	25.2	2271.2	1979.1	1783.1	406.7	305.1	256.1	0.1730	0.1335	0.1168
400	398	37	3.70	25.9	2399.1	2090.6	1883.6	429.7	322.2	270.5	0.1638	0.1263	0.1105
420	420	37	3.80	26.6	2530.6	2205.1	1986.8	453.2	339.9	285.3	0.1553	0.1198	0.1048
450	451	37	3.94	27.6	2720.5	2370.6	2135.9	487.2	365.4	306.8	0.1444	0.1114	0.0975
465	465	37	4.00	28.0	2803.9	2443.4	2201.4	502.2	376.6	316.2	0.1401	0.1081	0.0946
500	503	37	4.16	29.1	3032.7	2642.7	2381.0	543.1	407.3	342.0	0.1296	0.1000	0.0875
510	513	37	4.20	29.4	3091.3	2693.8	2427.0	553.6	415.2	348.6	0.1271	0.0981	0.0858
590	588	37	4.50	31.5	3548.7	3092.4	2786.2	635.5	476.7	400.2	0.1107	0.0854	0.0747
600	599	37	4.54	31.9	3612.1	3147.6	2835.9	646.9	485.2	407.3	0.1088	0.0839	0.0734
600	600	61	3.54	32.7	3626.0	3159.7	2846.8	616.0	462.0	387.8	0.1087	0.0838	0.0734
630	631	61	3.63	32.7	3812.7	3322.4	2993.4	647.7	485.8	407.8	0.1034	0.0797	0.0698
670	670	37	4.80	33.6	4037.7	3518.5	3170.0	723.1	542.3	455.3	0.0973	0.0751	0.0657
800	805	61	4.10	36.9	4863.9	4238.4	3818.7	826.3	619.7	520.3	0.0810	0.0625	0.0547

B.9 国外导线参数

B.9.1 美国标准

钢芯铝绞线、铝包钢芯铝绞线的美国标准见表 B-16、表 B-17。

表 B-16　　钢芯铝绞线（ASTMB232）

牌号	导体线规（kcmil）	绞线股数（Al/St）	外径（mm）			质量（kg/km）			额定强度（kN）	直流电阻 20℃（Ω/km）
			铝 Al	钢 St	合计	铝 Al	钢 St	合计		
Turkey	6	6/1	1.68	1.68	5.03	36.46	17.25	53.7	5.29	2.1030
Swan	4	6/1	2.12	2.12	6.35	57.88	27.39	85.3	8.28	1.3222
Swanate	4	7/1	1.96	2.62	6.53	57.85	41.7	99.6	10.50	1.3090
Sparrow	2	6/1	2.67	2.67	8.03	92.12	43.59	136	12.68	0.8333
Sparate	2	7/1	2.47	3.30	8.26	92.16	66.46	159	15.39	0.8235
Robin	1	6/1	3.00	3.00	8.99	116.3	55.01	171	15.79	0.6594
Raven	1/0	6/1	3.37	3.37	10.11	146.6	69.35	216	19.49	0.5216
Quail	2/0	6/1	3.78	3.78	11.35	184.6	87.37	272	23.62	0.4134
Pigeon	3/0	6/1	4.25	4.25	12.75	232.7	110.1	343	29.45	0.3281
Penguin	4/0	6/1	4.77	4.77	14.30	293.7	139.0	433	37.15	0.2608
Waxwing	266.8	18/1	3.09	3.09	15.47	371.8	58.38	430	30.61	0.2110
Partridge	266.8	26/7	2.57	2.00	16.31	374.0	171.9	546	50.27	0.2090
Ostrich	300	26/7	2.73	2.12	17.27	420.2	193.2	613	56.50	0.1860
Merlin	336.4	18/1	3.47	3.47	17.37	469.2	73.61	543	38.62	0.1673
Linnet	336.4	26/7	2.89	2.25	18.29	471.0	216.5	687	62.73	0.1657
Oriole	336.4	30/7	2.69	2.69	18.82	472.7	310.6	783	76.97	0.1647
Chickadee	397.5	18/1	3.77	3.77	18.87	554.3	87.03	641	44.22	0.1417
Brant	397.5	24/7	3.27	2.18	19.61	557.1	203.9	761	64.96	0.1411
Ibis	397.5	26/7	3.14	2.44	19.89	556.6	255.8	812	72.52	0.1404
Lark	397.5	30/7	2.92	2.92	20.47	558.4	366.9	925	90.31	0.1394
Pelican	477	18/1	4.14	4.14	20.68	665.4	104.4	770	52.50	0.1181
Flicker	477	24/7	3.58	2.39	21.49	668.8	244.7	913	76.52	0.1175
Hawk	477	26/7	3.44	2.67	21.79	668.0	307.1	975	86.76	0.1168
Hen	477	30/7	3.20	3.20	22.43	670.3	440.4	1111	105.9	0.1161
Osprey	556.5	18/1	4.47	4.47	22.33	775.8	121.7	898	60.95	0.1010
Parakeet	556.5	24/7	3.87	2.58	23.22	780.1	285.5	1066	88.01	0.1007
Dove	556.5	26/7	3.72	2.89	23.55	780.1	358.6	1139	100.5	0.1004
Eagle	556.5	30/7	3.46	3.46	24.21	781.9	513.7	1296	123.6	0.0994
Peacock	605	24/7	4.03	2.69	24.21	848.3	310.6	1159	96.01	0.0925
Squab	605	26/7	3.87	3.01	24.54	847.5	389.5	1237	108.0	0.0922
Wood Duck	605	30/7	3.61	3.61	25.25	850.0	558.4	1408	128.5	0.0915
Teal	605	30/19	3.61	2.16	25.25	850.0	546.6	1397	133.4	0.0915
Kingbird	636	18/1	4.78	4.78	23.88	887.3	139.3	1027	69.79	0.0886
Swift	636	36/1	3.38	3.38	23.62	886.9	69.63	956	60.85	0.0889

续表

牌号	导体线规（kcmil）	绞线股数（Al/St）	外径（mm）			质量（kg/km）			额定强度（kN）	直流电阻 20℃（Ω/km）
			铝 Al	钢 St	合计	铝 Al	钢 St	合计		
Rook	636	24/7	4.14	2.76	24.82	891.3	326.16	1217	97.79	0.0879
Grosbeak	636	26/7	3.97	3.09	25.17	891.2	409.6	1301	112.0	0.0876
Scoter	636	30/7	3.70	3.70	25.88	893.61	587.1	1481	135.1	0.0840
Egret	636	30/19	3.70	2.22	25.88	893.86	575.1	1469	140.0	0.0873
Flamingo	666.6	24/7	4.23	2.82	25.40	934.57	342.0	1277	105.3	0.0840
Gannet	666.6	26/7	4.07	3.16	25.76	934	429.3	1363	117.3	0.0837
Stilt	715.5	24/7	4.39	2.92	26.31	1003.2	366.9	1370	113.3	0.0784
Starling	715.5	26/7	4.21	3.28	26.70	1002.8	460.9	1464	126.2	0.0781
Redwing	715.5	30/19	3.92	2.35	27.46	1004.4	646.2	1651	153.8	0.0774
Coot	795	36/1	3.77	3.77	26.42	1108.7	87.05	1196	74.28	0.0712
Drake	795	26/7	4.44	3.45	28.12	1114.6	512.3	1627	140.0	0.0702
Tern	795	45/7	3.38	2.25	27.00	1113.9	217.4	1331	98.23	0.0709
Condor	795	54/7	3.08	3.08	27.74	1114	407.6	1522	125.3	0.0705
Mallard	795	30/19	4.14	2.48	28.96	1117.4	718.6	1836	170.7	0.0699
Ruddy	900	45/7	3.59	2.40	28.73	1261.2	246.2	1507	108.5	0.0627
Canary	900	54/7	3.28	3.28	29.51	1261.6	461.4	1723	141.8	0.0623
Rail	954	45/7	3.70	2.47	29.59	1337.1	261.0	1598	115.1	0.0591
Cardinal	954	54/7	3.38	3.38	30.38	1336.8	489.2	1826	150.2	0.0587
Ortolan	1033.5	45/7	3.85	2.57	30.78	1447.6	282.5	1730	123.1	0.0548
Curlew	1033.5	54/7	3.51	3.51	31.62	1447.6	529.7	1977	162.7	0.0541
Bluejay	1113	45/7	4.00	2.66	31.95	1560.7	304.6	1865	132.5	0.0509
Finch	1113	54/19	3.65	2.19	32.82	1568.8	559.2	2128	173.8	0.0505
Bunting	1192.5	45/7	4.14	2.76	33.07	1671.4	326.2	1998	142.2	0.0472
Grackle	1192.5	54/19	3.77	2.27	33.96	1679.9	598.9	2279	186.2	0.0472
Bittern	1272	45/7	4.27	2.85	34.16	1782.4	347.9	2130	151.6	0.0443
Pheasant	1272	54/19	3.90	2.34	35.08	1791.9	639.1	2431	153.8	0.0443
Dipper	1351.5	45/7	4.40	2.93	35.20	1893.9	369.64	2264	160.9	0.0417
Martin	1351.5	54/19	4.02	2.41	36.17	1903.2	678.5	2582	205.8	0.0417
Bobolink	1431	45/7	4.53	3.02	36.25	2005.2	391.4	2397	170.2	0.0394
Lapwing	1590	45/7	4.78	3.18	38.20	2228.9	435.0	2664	187.6	0.0354
Falcon	1590	54/19	4.36	2.62	39.22	2240.1	798.6	3039	242.3	0.0354
Chukar	1780	84/19	3.70	2.22	40.69	2508.3	575.0	3083	226.7	0.0318
Bluebird	2156	84/19	4.07	2.44	44.75	3035.4	696.4	3732	268.0	0.0263
Kiwi	1098	72/7	4.41	2.94	44.07	3052.8	370.4	3423	221.4	0.0263
Grouse	80	8/1	2.54	4.23	9.32	111.8	109.7	221.5	23.11	0.6791
Petrel	101.8	12/7	2.34	2.34	11.71	142.7	234.9	377.6	46.23	0.5184
Minorca	110.8	12/7	2.44	2.44	12.22	155.2	255.9	411.1	50.23	0.4757
Leghorn	134.6	12/7	2.69	2.69	13.46	188.6	310.6	499.2	60.45	0.3937

续表

牌号	导体线规（kcmil）	绞线股数（Al/St）	外径（mm）			质量（kg/km）			额定强度（kN）	直流电阻 20℃（Ω/km）
			铝 Al	钢 St	合计	铝 Al	钢 St	合计		
Guinea	159	12/7	2.92	2.92	14.63	222.8	366.9	589.7	71.12	0.3314
Dotterel	176.9	12/7	3.08	3.08	15.42	247.9	408.1	656.1	76.90	0.2989
Dorking	190.8	12/7	3.20	3.20	16.00	267.5	440.4	707.8	83.12	0.2772
Cochin	211.3	12/7	3.37	3.37	16.84	296.3	487.6	783.9	126.2	0.2503

表 B-17　铝包钢芯铝绞线（ASTM B549）

牌号	铝截面（kcmil）	绞线股数（Al/St）	外径（mm）			额定强度（kN）	质量（kg/km）	直流电阻 20℃（Ω/km）
			铝 Al	铝包钢 ACS	合计			
Sparrow/AW	66.36	6/1	2.67	2.67	8.03	12.30	129	0.8077
Robin/AW	83.69	6/1	3.00	3.00	8.99	15.35	163	0.6398
Raven/AW	105.6	6/1	3.37	3.37	10.11	18.91	205	0.5075
Quail/AW	133.1	6/1	3.78	3.78	11.35	22.82	259	0.4026
Pigeon/AW	167.8	6/1	4.25	4.25	12.75	28.03	326	0.3198
Penguin/AW	211.6	6/1	4.77	4.77	14.30	34.21	411	0.2535
Waxwing/AW	266.8	18/1	3.09	3.09	15.47	30.34	421	0.2088
Partridge/AW	266.8	26/7	2.57	2.00	16.31	48.05	520	0.2024
Ostrich/AW	300.0	26/7	2.73	2.12	17.27	53.83	584	0.1801
Merlin/AW	336.4	18/1	3.47	3.47	17.37	37.99	532	0.1655
Linnet/AW	336.4	26/7	2.89	2.25	18.29	60.06	654	0.1607
Oriole/AW	336.4	30/7	2.69	2.69	18.82	74.30	736	0.1573
Chickadee/AW	397.5	18/1	3.77	3.77	18.87	43.51	628	0.1400
Brant/AW	397.5	24/7	3.27	2.18	19.61	62.73	730	0.1373
Ibis/AW	397.5	26/7	3.14	2.44	19.89	70.29	773	0.1360
Lark/AW	397.5	30/7	2.92	2.92	20.47	87.20	869	0.1332
Pelican/AW	477.0	18/1	4.14	4.14	20.68	51.16	755	0.1167
Flicker/AW	477.0	24/7	3.58	2.39	21.49	74.30	877	0.1144
Hawk/AW	477.0	26/7	3.44	2.68	21.79	84.09	929	0.1133
Hen/AW	477.0	30/7	3.20	3.20	22.43	104.1	1043	0.1110
Ospray/AW	556.5	18/1	4.47	4.47	22.33	58.73	879	0.1001
Parakeet/AW	556.5	24/7	3.87	2.58	23.22	85.87	1022	0.0981
Dove/AW	556.5	26/7	3.72	2.89	23.55	97.43	1084	0.0970
Eagle/AW	556.5	30/7	3.46	3.46	24.21	119.2	1217	0.0951
Peacock/AW	605.0	24/7	4.03	2.69	24.21	93.43	1111	0.0902
Squab/AW	605.0	26/7	3.87	3.01	24.54	105.0	1178	0.0849
Teal/AW	605.0	30/19	3.61	2.16	25.25	126.8	1313	0.0877
Kingbird/AW	636.0	18/1	4.78	4.78	23.88	66.74	1005	0.0875
Rook/AW	636.0	24/7	4.14	2.76	24.82	97.88	1168	0.0858

续表

牌号	铝截面（kcmil）	绞线股数（Al/St）	外径（mm）			额定强度（kN）	质量（kg/km）	直流电阻 20℃（Ω/km）
			铝 Al	铝包钢 ACS	合计			
Grosbeak/AW	636.0	26/7	3.97	3.09	25.15	110.3	1238	0.0849
Egret/AW	636.0	30/19	3.70	2.22	25.88	133.0	1381	0.0834
Flamingo/AW	666.6	24/7	4.23	2.82	25.40	102.8	1224	0.0819
Gannet/AW	666.6	26/7	4.07	3.16	25.76	115.7	1298	0.0810
Starling/AW	715.5	26/7	4.21	3.28	26.70	122.3	1393	0.0755
Redwing/AW	715.5	30/19	3.92	2.35	27.46	148.6	1552	0.0741
Tern/AW	795.0	45/7	3.38	2.25	27.00	95.65	1298	0.0700
Cuckoo/AW	795.0	24/7	4.62	3.08	27.74	122.3	1459	0.0687
Condor/AW	795.0	54/7	3.08	3.08	27.72	123.7	1459	0.0686
Drake/AW	795.0	26/7	4.44	3.45	28.11	135.7	1549	0.0679
Mallard/AW	795.0	30/19	4.14	2.48	28.04	165.1	1726	0.0667
Canary/AW	900.0	54/7	3.28	3.28	28.73	137.9	1653	0.0619
Ruddy/AW	900.0	45/7	3.59	2.40	29.51	106.8	1470	0.0607
Cardinal/AW	954.0	54/7	3.38	3.38	29.59	146.4	1751	0.0584
Rail /AW	954.0	45/7	3.70	2.47	29.61	113.0	1558	0.0572
Curlew/AW	1033.5	54/7	3.51	3.51	30.78	158.4	1896	0.0538
Ortolan/AW	1033.5	45/7	3.85	2.57	31.65	120.6	1687	0.0528
Finch/AW	1113.0	54/19	3.65	2.19	31.98	166.8	2043	0.0527
Bluejay/AW	1113.0	45/7	4.00	2.66	32.84	130.4	1819	0.0493
Grackle/AW	1192.5	54/19	3.77	2.27	33.07	178.8	2187	0.0467
Bunting/AW	1192.5	45/7	4.14	2.76	33.99	139.3	1948	0.0460
Pheasant/AW	1272	54/19	3.90	2.34	34.16	188.6	2333	0.0438
Bittern/AW	1272	45/7	4.27	2.85	35.10	148.6	2077	0.0431
Martin/AW	1351.5	54/19	4.02	2.41	35.20	200.6	2478	0.0412
Dipper/AW	1351.5	45/7	4.40	2.93	36.17	157.9	2207	0.0406
Plover/AW	1431.0	54/19	4.14	2.48	36.25	212.2	2625	0.0389
Bobolink/AW	1431.0	45/7	4.53	3.02	32.13	167.3	2337	0.0384
Parrot/AW	1510.5	54/19	4.25	2.55	37.21	223.8	2768	0.0369
Nuthatch/AW	1510.5	45/7	4.65	3.10	38.23	176.6	2467	0.0363
Falcon/AW	1590.0	54/19	4.36	2.62	38.20	235.8	2917	0.0351
Lapwing/AW	1590.0	45/7	4.78	3.18	39.24	186.0	2598	0.0345
Chukar/AW	1780.0	84/19	3.70	2.22	40.69	219.8	2995	0.0319
Kiwi/AW	2167.0	72/7	4.41	2.94	44.07	218.4	3367	0.0260
Bluebird/AW	2156.0	84/19	4.07	2.44	44.75	262.5	3626	0.0258
Thrasher/AW	2312.0	76/19	4.43	2.07	45.79	246	3679	0.0243

B.9.2 欧洲标准（EN 50182—2001）

欧洲导线参数标准见表 B-18～表 B-37。

表 B-18 钢芯铝绞线（奥地利）

代码	老代码	面积			根数		单线直径		直径		单位长度质量	额定拉断力	直流电阻	弹性系数	膨胀系数
		铝	钢	总数			铝	钢	芯	导体					
		(mm^2)	(mm^2)	(mm^2)	铝	钢	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/km)	(kN)	(Ω/km)	(N/mm^2)	(1/K)
34-AL1/6-ST1A	35/6	34.4	5.73	40.1	6	1	2.70	2.70	2.70	8.1	138.7	12.37	0.8342	81000	1.92E-05
48-AL1/8-ST1A	50/8	48.3	8.04	56.3	6	1	3.20	3.20	3.20	9.6	194.8	16.81	0.5939	81000	1.92E-05
70-AL1/11-ST1A	70/12	69.9	11.4	81.3	26	7	1.85	1.44	4.32	11.7	282.2	26.27	0.4132	77000	1.92E-05
94-AL1/22-ST1A	94/22	94.2	22.0	116.2	30	7	2.00	2.00	6.00	14.0	432.5	43.17	0.3067	82000	1.92E-05
94-AL1/15-ST1A	95/15	94.4	15.3	109.7	26	7	2.15	1.67	5.01	13.6	380.6	34.93	0.3060	77000	1.92E-05
97-AL1/34-ST1A	95/34	96.8	34.4	131.1	36	7	1.85	2.50	7.50	14.9	536.5	57.07	0.2990	90000	1.92E-05
122-AL1/20-ST1A	120/20	121.6	19.8	141.4	26	7	2.44	1.90	5.70	15.5	491.0	44.50	0.2376	77000	1.92E-05
119-AL1/42-ST1A	120/42	118.8	41.6	160.4	36	7	2.05	2.75	8.25	16.5	653.9	68.79	0.2435	90000	1.92E-05
128-AL1/30-ST1A	125/30	127.9	29.8	157.8	30	7	2.33	2.33	6.99	16.3	587.0	56.41	0.2260	82000	1.92E-05
149-AL1/24-ST1A	150/25	148.9	24.2	173.1	26	7	2.70	2.10	6.30	17.1	600.8	53.67	0.1940	77000	1.92E-05
150-AL1/53-ST1A	150/53	149.6	52.8	202.4	36	7	2.30	3.10	9.30	18.5	827.1	84.29	0.1934	90000	1.92E-05
172-AL1/40-ST1A	170/40	171.8	40.1	211.8	30	7	2.70	2.70	8.10	18.9	788.2	74.89	0.1683	82000	1.92E-05
184-AL1/30-ST1A	185/30	183.8	29.8	213.6	26	7	3.00	2.33	6.99	19.0	741.0	65.27	0.1571	77000	1.92E-05
209-AL1/34-ST1A	210/35	209.1	34.1	243.2	26	7	3.20	2.49	7.47	20.3	844.1	73.36	0.1381	77000	1.92E-05
212-AL1/49-ST1A	210/50	212.1	49.5	261.5	30	7	3.00	3.00	9.00	21.0	973.1	92.46	0.1363	82000	1.92E-05
243-AL1/39-ST1A	240/40	243.1	39.5	282.5	26	7	3.45	2.68	8.04	21.8	980.1	85.12	0.1188	77000	1.92E-05
238-AL1/82-ST1A	240/80	237.8	82.4	320.2	36	19	2.90	2.35	11.8	23.4	1305.3	134.37	0.1218	99890	1.92E-05
257-AL1/60-ST1A	257/60	256.6	59.9	316.5	30	7	3.30	3.30	9.90	23.1	1177.5	108.20	0.1126	82000	1.92E-05
304-AL1/49-ST1A	300/50	304.3	49.5	353.7	26	7	3.86	3.00	9.00	24.4	1227.3	105.09	0.0949	77000	1.92E-05
341-AL1/109-ST1A	340/110	341.2	108.8	450.0	78	19	2.36	2.70	13.5	27.7	1797.4	183.73	0.0848	84000	1.92E-05
382-AL1/49-ST1A	380/50	381.7	49.5	431.2	54	7	3.00	3.00	9.00	27.0	1442.5	121.30	0.0758	70000	1.92E-05
449-AL1/39-ST1A	450/40	448.7	39.5	488.2	48	7	3.45	2.68	8.04	28.7	1549.1	119.05	0.0644	62000	1.92E-05
562-AL1/49-ST1A	560/50	561.7	49.5	611.2	48	7	3.86	3.00	9.00	32.2	1939.5	146.28	0.0515	62000	1.92E-05
635-AL1/117-ST1A	635/117	634.7	117.0	751.7	38+22	19	3.25/4.30	2.80	14.0	35.6	2671.2	236.50	0.0455	84120	1.92E-05
679-AL1/86-ST1A	680/85	678.6	86.0	764.5	54	19	4.00	2.40	12.0	36.0	2549.7	206.56	0.0426	68000	1.92E-05
1288-AL1/183-ST1A	1280/183	1288.2	182.8	1471.1	100	19	4.05	3.50	17.5	49.9	5001.6	407.20	0.0225	79260	1.92E-05

表 B-19 钢芯铝合金绞线（奥地利）

代码	老代码	面积			根数		单线直径		直径		单位长度质量	额定拉断力	直流电阻	弹性系数	膨胀系数
		铝	钢	总数			铝	钢	芯	导体					
		(mm^2)	(mm^2)	(mm^2)	铝	钢	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/km)	(kN)	(Ω/km)	(N/mm^2)	(1/K)
34-AL3/6-ST1A	35/6	34.4	5.73	40.1	6	1	2.70	2.70	2.70	8.1	138.6	16.66	0.9601	81000	1.92E-05
48-AL3/8-ST1A	50/8	48.3	8.04	56.3	6	1	3.20	3.20	3.20	9.6	194.7	23.08	0.6835	81000	1.92E-05
70-AL3/11-ST1A	70/12	69.9	11.4	81.3	26	7	1.85	1.44	4.32	11.7	282.0	33.96	0.4756	77000	1.89E-05
94-AL3/22-ST1A	94/22	94.2	22.0	116.2	30	7	2.00	2.00	6.00	14.0	432.2	53.53	0.3530	82000	1.78E-05

续表

代码	老代码	面积			根数		单线直径		直径		单位长度质量	额定拉断力	直流电阻	弹性系数	膨胀系数
		铝	钢	总数			铝	钢	芯	导体					
		(mm²)	(mm²)	(mm²)	铝	钢	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/km)	(kN)	(Ω/km)	(N/mm²)	(1/K)
94-AL3/15-ST1A	95/15	94.4	15.3	109.7	26	7	2.15	1.67	5.01	13.6	380.3	45.79	0.3521	77000	1.89E-05
97-AL3/34-ST1A	95/34	96.8	34.4	131.1	36	7	1.85	2.50	7.50	14.9	536.2	67.72	0.3441	90000	1.67E-05
122-AL3/20-ST1A	120/20	121.6	19.8	141.4	26	7	2.44	1.90	5.70	15.5	490.6	59.09	0.2734	77000	1.89E-05
119-AL3/42-ST1A	120/42	118.8	41.6	160.4	36	7	2.05	2.75	8.25	16.5	653.6	82.45	0.2803	90000	1.67E-05
128-AL3/30-ST1A	125/30	127.9	29.8	157.8	30	7	2.33	2.33	6.99	16.3	586.6	71.76	0.2601	82000	1.78E-05
149-AL3/24-ST1A	150/25	148.9	24.2	173.1	26	7	2.70	2.10	6.30	17.1	600.3	72.28	0.2233	77000	1.89E-05
150-AL3/53-ST1A	150/53	149.6	52.8	202.4	36	7	2.30	3.10	9.30	18.5	826.6	102.24	0.2226	90000	1.67E-05
172-AL3/40-ST1A	170/40	171.8	40.1	211.8	30	7	2.70	2.70	8.10	18.9	787.7	96.36	0.1937	82000	1.78E-05
184-AL3/30-ST1A	185/30	183.8	29.8	213.6	26	7	3.00	2.33	6.99	19.0	740.4	88.24	0.1809	77000	1.89E-05
209-AL3/34-ST1A	210/35	209.1	34.1	243.2	26	7	3.20	2.49	7.47	20.3	843.5	100.54	0.1590	77000	1.89E-05
212-AL3/49-ST1A	210/50	212.1	49.5	261.5	30	7	3.00	3.00	9.00	21.0	972.5	118.96	0.1569	82000	1.78E-05
243-AL3/39-ST1A	240/40	243.1	39.5	282.5	26	7	3.45	2.68	8.04	21.8	979.4	116.72	0.1368	77000	1.89E-05
238-AL3/82-ST1A	240/80	237.8	82.4	320.2	36	19	2.90	2.35	11.8	23.4	1304.6	164.09	0.1402	99890	1.64E-05
257-AL3/60-ST1A	257/60	256.6	59.9	316.5	30	7	3.30	3.30	9.90	23.1	1176.7	141.55	0.1296	82000	1.78E-05
304-AL3/49-ST1A	300/50	304.3	49.5	353.7	26	7	3.86	3.00	9.00	24.4	1226.4	146.16	0.1092	77000	1.89E-05
341-AL3/109-ST1A	340/110	341.2	108.8	450.0	78	19	2.36	2.70	13.5	27.7	1796.4	224.67	0.0976	84000	1.67E-05
382-AL3/49-ST1A	380/50	381.7	49.5	431.2	54	7	3.00	3.00	9.00	27.0	1441.4	169.01	0.0872	70000	1.93E-05
449-AL3/39-ST1A	450/40	448.7	39.5	488.2	48	7	3.45	2.68	8.04	28.7	1547.7	177.39	0.0741	62000	2.09E-05
562-AL3/49-ST1A	560/50	561.7	49.5	611.2	48	7	3.86	3.00	9.00	32.2	1937.8	222.11	0.0592	62000	2.09E-05
635-AL3/117-ST1A	635/117	634.7	117.0	751.7	38+22	19	3.25/4.30	2.80	14.0	35.6	2669.2	320.62	0.0524	84120	1.82E-05
679-AL3/86-ST1A	680/85	678.6	86.0	764.5	54	19	4.00	2.40	12.0	36.0	2547.6	298.17	0.0490	68000	1.94E-05
1288-AL3/183-ST1A	1280/183	1288.2	182.8	1471.1	100	19	4.05	3.50	17.5	49.9	4997.6	581.12	0.0259	79260	1.90E-05

表 B-20　　钢芯铝绞线（芬兰）

代码	老代码	面积			根数		单线直径		直径		单位长度质量	额定拉断力	直流电阻
		铝	钢	总数			铝	钢	芯	导体			
		(mm²)	(mm²)	(mm²)	铝	钢	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/km)	(kN)	(Ω/km)
34-AL1/6-ST1A	ACSR34/6 SPARROW	33.8	5.64	39.5	6	1	2.68	2.68	2.68	8.04	136.6	12.18	0.8467
54-AL1/9-ST1A	ACSR54/9 RAVEN	53.5	8.92	62.4	6	1	3.37	3.37	3.37	10.11	216.1	18.64	0.5355
85-AL1/14-ST1A	ACSR85/14 PIGEON	85.1	14.2	99.3	6	1	4.25	4.25	4.25	12.75	343.6	29.22	0.3367
106-AL1/25-ST1A	ACSR106/25 SUURSAVO	105.9	24.7	130.6	30	7	2.12	2.12	6.36	14.84	485.9	47.97	0.2729
152-AL1/25-ST1A	ACSR152/25 OSTRICH	152.2	24.7	176.9	26	7	2.73	2.12	6.36	17.28	613.6	54.78	0.1898
305-AL1/39-ST1A	ACSR305/39 DUCK	304.6	39.5	344.1	54	7	2.68	2.68	8.04	24.12	1151.2	96.80	0.0949
565-AL1/72-ST1A	ACSR565/72 FINCH	565.0	71.6	636.6	54	19	3.65	2.19	10.95	32.85	2123.0	174.14	0.0512
42-AL1/25-ST1A	ACSR42/25 SAVO	42.4	24.7	67.1	12	7	2.12	2.12	6.36	10.60	310.2	36.53	0.6817
89-AL1/52-ST1A	ACSR89/52 DOTTEREL	89.4	52.2	141.6	12	7	3.08	3.08	9.24	15.40	654.8	72.12	0.3230
93-AL1/39-ST1A	ACSR93/39 IMATRA	92.9	39.5	132.4	10	7	3.44	2.68	8.04	14.92	565.1	60.35	0.3102
148-AL1/67-ST1A	ACSR148/68 KUOPIO	148.3	67.1	215.3	42	19	2.12	2.12	10.60	19.08	937.3	105.16	0.1955

表 B-21　　钢芯铝绞线（法国）

代码	老代码	面积			根数		单线直径		直径		单位长度质量	额定拉断力	直流电阻	弹性系数	膨胀系数
		铝	钢	总数			铝	钢	芯	导体					
		(mm²)	(mm²)	(mm²)	铝	钢	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/km)	(kN)	(Ω/km)	(N/mm²)	(1/K)
28-AL1/9-ST1A	CANNA 37.7	28.3	9.42	37.7	9	3	2.00	2.00	4.30	8.30	151.5	16.26	1.0187	88000	1.71E-05
38-AL1/22-ST1A	CANNA 59.7	37.7	22.0	59.7	12	7	2.00	2.00	6.00	10.0	276.1	32.70	0.7660	103500	1.54E-05
48-AL1/28-ST1A	CANNA 75.5	47.7	27.8	75.5	12	7	2.25	2.25	6.75	11.3	349.4	41.15	0.6052	103500	1.54E-05
59-AL1/34-ST1A	CANNA 93.3	58.9	34.4	93.3	12	7	2.50	2.50	7.50	12.5	431.4	49.48	0.4902	103500	1.54E-05
94-AL1/22-ST1A	CANNA 116.2	94.2	22.0	116.2	30	7	2.00	2.00	6.00	14.0	432.5	43.17	0.3067	75500	1.80E-05
119-AL1/28-ST1A	CANNA 147.1	119.3	27.8	147.1	30	7	2.25	2.25	6.75	15.8	547.4	54.03	0.2423	75500	1.80E-05
147-AL1/34-ST1A	CANNA 181.6	147.3	34.4	181.6	30	7	2.50	2.50	7.50	17.5	675.8	64.94	0.1963	75500	1.80E-05
185-AL1/43-ST1A	CANNA 228	184.7	43.1	227.8	30	7	2.80	2.80	8.40	19.6	847.7	80.54	0.1565	75500	1.80E-05
234-AL1/55-ST1A	CANNA 288	233.8	54.6	288.3	30	7	3.15	3.15	9.45	22.1	1072.8	98.58	0.1236	75500	1.80E-05
94-AL1/22-ST6C	CROCUS 116.2	94.2	22.0	116.2	30	7	2.00	2.00	6.00	14.0	432.5	49.32	0.3067	75500	1.80E-05
119-AL1/28-ST6C	CROCUS 147.1	119.3	27.8	147.1	30	7	2.25	2.25	6.75	15.8	547.4	61.83	0.2423	75500	1.80E-05
147-AL1/34-ST6C	CROCUS 181.6	147.3	34.4	181.6	30	7	2.50	2.50	7.50	17.5	675.8	74.22	0.1963	75500	1.80E-05
185-AL1/43-ST6C	CROCUS 228	184.7	43.1	227.8	30	7	2.80	2.80	8.40	19.6	847.7	92.18	0.1565	75500	1.80E-05
234-AL1/55-ST6C	CROCUS 288	233.8	54.6	288.3	30	7	3.15	3.15	9.45	22.1	1072.8	113.86	0.1236	75500	1.80E-05
222-AL1/76-ST6C	CROCUS 297	221.7	75.5	297.2	36	19	2.80	2.25	11.3	22.5	1206.8	147.22	0.1307	79000	1.69E-05
326-AL1/86-ST6C	CROCUS 412	325.7	86.0	411.7	32	19	3.60	2.40	12.0	26.4	1576.1	173.31	0.0889	72000	1.76E-05
508-AL1/105-ST6C	CROCUS 612	507.8	104.8	612.6	66	19	3.13	2.65	13.3	32.0	2226.5	231.55	0.0570	66500	1.83E-05
717-AL1/148-ST6C	CROCUS 865	717.3	148.1	865.4	66	19	3.72	3.15	15.8	38.1	3145.4	319.11	0.0403	66500	1.83E-05
957-AL1/228-ST6C	CROCUS 1185	956.7	227.8	1184.5	54	37	2.80	2.80	19.6	44.7	4433.6	480.75	0.0302	63000	1.83E-05

表 B-22　　钢芯铝合金绞线（法国）

代码	老代码	面积			根数		单线直径		直径		单位长度质量	额定拉断力	直流电阻	弹性系数	膨胀系数
		铝	钢	总数			铝	钢	芯	导体					
		(mm²)	(mm²)	(mm²)	铝	钢	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/km)	(kN)	(Ω/km)	(N/mm²)	(1/K)
28-AL4/9-ST6C	PHLOX 37.7	28.3	9.4	37.7	9	3	2.00	2.00	4.30	8.30	151.4	22.86	1.1750	93000	1.70E-05
38-AL4/22-ST6C	PHLOX 59.7	37.7	22.0	59.7	12	7	2.00	2.00	6.00	10.0	276.0	44.14	0.8835	108000	1.53E-05
48-AL4/28-ST6C	PHLOX 75.5	47.7	27.8	75.5	12	7	2.25	2.25	6.75	11.3	349.3	55.86	0.6981	108000	1.53E-05
52-AL4/42-ST6C	PHLOX 94.1	52.0	42.1	94.1	15	19	2.10	1.68	8.40	12.6	474.2	77.96	0.6435	112000	1.47E-05
57-AL4/60-ST6C	PHLOX 116.2	56.5	59.7	116.2	18	19	2.00	2.00	10.0	14.0	625.0	104.93	0.5921	124000	1.42E-05
72-AL4/76-ST6C	PHLOX 147.1	71.6	75.5	147.1	18	19	2.25	2.25	11.3	15.8	791.0	132.80	0.4678	124000	1.42E-05
119-AL4/28-ST6C	PASTEL 147.1	119.3	27.8	147.1	30	7	2.25	2.25	6.75	15.8	547.0	79.12	0.2795	84000	1.81E-05
88-AL4/93-ST6C	PHLOX 181.6	88.4	93.3	181.6	18	19	2.50	2.50	12.5	17.5	976.6	160.22	0.3789	124000	1.42E-05
147-AL4/34-ST6C	PASTEL 181.6	147.3	34.4	181.6	30	7	2.50	2.50	7.50	17.5	675.3	96.31	0.2264	84000	1.81E-05
111-AL4/117-ST6C	PHLOX 228	110.8	117.0	227.8	18	19	2.80	2.80	14.0	19.6	1225.0	200.98	0.3021	124000	1.42E-05
185-AL4/43-ST6C	PASTEL 228	184.7	43.1	227.8	30	7	2.80	2.80	8.40	19.6	847.1	120.81	0.1805	84000	1.81E-05
140-AL4/148-ST6C	PHLOX 288	140.3	148.1	288.3	18	19	3.15	3.15	15.8	22.1	1550.4	249.93	0.2387	124000	1.42E-05
234-AL4/55-ST6C	PASTEL 288	233.8	54.6	288.3	30	7	3.15	3.15	9.45	22.1	1072.1	151.26	0.1426	84000	1.80E-05

续表

代码	老代码	面积			根数		单线直径		直径		单位长度质量	额定拉断力	直流电阻	弹性系数	膨胀系数
		铝	钢	总数			铝	钢	芯	导体					
		(mm²)	(mm²)	(mm²)	铝	钢	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/km)	(kN)	(Ω/km)	(N/mm²)	(1/K)
206-AL4/93-ST6C	PASTEL 299	206.2	93.3	299.4	42	19	2.50	2.50	12.5	22.5	1302.8	198.51	0.1622	96500	1.63E-05
148-AL4/228-ST6C	PHLOX 376	147.8	227.8	375.6	24	37	2.80	2.80	19.6	25.2	2202.4	369.27	0.2270	130000	1.35E-05
326-AL4/86-ST6C	PASTEL 412	325.7	86.0	411.7	32	19	3.60	2.40	12.0	26.4	1575.1	223.80	0.1025	82000	1.78E-05
508-AL4/105-ST6C	PETUNIA 612	507.8	104.8	612.6	66	19	3.13	2.65	13.3	32.0	2225.0	312.81	0.0657	77500	1.86E-05
717-AL4/148-ST6C	PASTEL 865	717.3	148.1	865.4	66	19	3.72	3.15	15.8	38.1	3143.2	430.29	0.0465	77500	1.85E-05
957-AL4/228-ST6C	POLYGONUM 1185	956.7	227.8	1184	54	37	2.80	2.80	19.6	42.0	4430.7	632.15	0.0349	75500	1.81E-05

表 B-23　　钢芯铝绞线（德国）

代码	老代码	面积			根数		单线直径		直径		单位长度质量	额定拉断力	直流电阻	弹性系数	膨胀系数
		铝	钢	总数			铝	钢	芯	导体					
		(mm²)	(mm²)	(mm²)	铝	钢	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/km)	(kN)	(Ω/km)	(N/mm²)	(1/K)
15-AL1/3-ST1A	16/2.5	15.3	2.54	17.8	6	1	1.80	1.80	1.80	5.40	61.6	5.80	1.8769	81000	1.92E-05
24-AL1/4-ST1A	25/4	23.9	3.98	27.8	6	1	2.25	2.25	2.25	6.75	96.3	8.95	1.2012	81000	1.92E-05
34-AL1/6-ST1A	35/6	34.4	5.73	40.1	6	1	2.70	2.70	2.70	8.10	138.7	12.37	0.8342	81000	1.92E-05
44-AL1/32-ST1A	44/32	44.0	31.7	75.6	14	7	2.00	2.40	7.20	11.2	369.3	44.24	0.6574	110000	1.50E-05
48-AL1/8-ST1A	50/8	48.3	8.04	56.3	6	1	3.20	3.20	3.20	9.60	194.8	16.81	0.5939	81000	1.92E-05
51-AL1/30-ST1A	50/30	51.2	29.8	81.0	12	7	2.33	2.33	6.99	11.7	374.7	42.98	0.5644	107000	1.53E-05
70-AL1/11-ST1A	70/12	69.9	11.4	81.3	26	7	1.85	1.44	4.32	11.7	282.2	26.27	0.4132	77000	1.89E-05
94-AL1/15-ST1A	95/15	94.4	15.3	109.7	26	7	2.15	1.67	5.01	13.6	380.6	34.93	0.3060	77000	1.89E-05
97-AL1/56-ST1A	95/55	96.5	56.3	152.8	12	7	3.20	3.20	9.60	16.0	706.8	77.85	0.2992	107000	1.53E-05
106-AL1/76-ST1A	105/75	105.7	75.5	181.2	14	19	3.10	2.25	11.3	17.5	885.3	105.82	0.2742	110000	1.50E-05
122-AL1/20-ST1A	120/20	121.6	19.8	141.4	26	7	2.44	1.90	5.70	15.5	491.0	44.50	0.2376	77000	1.89E-05
122-AL1/71-ST1A	120/70	122.1	71.3	193.4	12	7	3.60	3.60	10.8	18.0	894.5	97.92	0.2364	107000	1.53E-05
128-AL1/30-ST1A	125/30	127.9	29.8	157.8	30	7	2.33	2.33	6.99	16.3	587.0	56.41	0.2260	82000	1.78E-05
149-AL1/24-ST1A	150/25	148.9	24.2	173.1	26	7	2.70	2.10	6.30	17.1	600.8	53.67	0.1940	77000	1.89E-05
172-AL1/40-ST1A	170/40	171.8	40.1	211.8	30	7	2.70	2.70	8.10	18.9	788.2	74.89	0.1683	82000	1.78E-05
184-AL1/30-ST1A	185/30	183.8	29.8	213.6	26	7	3.00	2.33	6.99	19.0	741.0	65.27	0.1571	77000	1.89E-05
209-AL1/34-ST1A	210/35	209.1	34.1	243.2	26	7	3.20	2.49	7.47	20.3	844.1	73.36	0.1381	77000	1.89E-05
212-AL1/49-ST1A	210/50	212.1	49.5	261.5	30	7	3.00	3.00	9.00	21.0	973.1	92.46	0.1363	82000	1.78E-05
231-AL1/30-ST1A	230/30	230.9	29.8	260.8	24	7	3.50	2.33	6.99	21.0	870.9	72.13	0.1250	74000	1.96E-05
243-AL1/39-ST1A	240/40	243.1	39.5	282.5	26	7	3.45	2.68	8.04	21.8	980.1	85.12	0.1188	77000	1.89E-05
264-AL1/34-ST1A	265/35	263.7	34.1	297.7	24	7	3.74	2.49	7.47	22.4	994.4	81.04	0.1095	74000	1.96E-05
304-AL1/49-ST1A	300/50	304.3	49.5	353.7	26	7	3.86	3.00	9.00	24.4	1227.3	105.09	0.0949	77000	1.89E-05
305-AL1/39-ST1A	305/40	304.6	39.5	344.1	54	7	2.68	2.68	8.04	24.1	1151.2	96.80	0.0949	70000	1.93E-05
339-AL1/30-ST1A	340/30	339.3	29.8	369.1	48	7	3.00	2.33	6.99	25.0	1171.2	91.71	0.0852	62000	2.05E-05
382-AL1/49-ST1A	380/50	381.7	49.5	431.2	54	7	3.00	3.00	9.00	27.0	1442.5	121.30	0.0758	70000	1.93E-05
386-AL1/34-ST1A	385/35	386.0	34.1	420.1	48	7	3.20	2.49	7.47	26.7	1333.6	102.56	0.0749	62000	2.05E-05

续表

代码	老代码	面积			根数		单线直径		直径		单位长度质量	额定拉断力	直流电阻	弹性系数	膨胀系数
		铝	钢	总数			铝	钢	芯	导体					
		(mm^2)	(mm^2)	(mm^2)	铝	钢	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/km)	(kN)	(Ω/km)	(N/mm^2)	(1/K)
434-AL1/56-ST1A	435/55	434.3	56.3	490.6	54	7	3.20	3.20	9.60	28.8	1641.3	133.59	0.0666	70000	1.93E-05
449-AL1/39-ST1A	450/40	448.7	39.5	488.2	48	7	3.45	2.68	8.04	28.7	1549.1	119.05	0.0644	62000	2.05E-05
490-AL1/64-ST1A	490/65	490.3	63.6	553.8	54	7	3.40	3.40	10.2	30.6	1852.9	150.81	0.0590	70000	1.93E-05
494-AL1/34-ST1A	495/35	494.4	34.1	528.4	45	7	3.74	2.49	7.47	29.9	1632.6	117.96	0.0584	61000	2.09E-05
511-AL1/45-ST1A	510/45	510.5	45.3	555.8	48	7	3.68	2.87	8.61	30.7	1765.3	133.31	0.0566	62000	2.05E-05
550-AL1/71-ST1A	550/70	549.7	71.3	620.9	54	7	3.60	3.60	10.8	32.4	2077.2	166.32	0.0526	70000	1.93E-05
562-AL1/49-ST1A	560/50	561.7	49.5	611.2	48	7	3.86	3.00	9.00	32.2	1939.5	146.28	0.0515	62000	2.05E-05
571-AL1/39-ST1A	570/40	571.2	39.5	610.6	45	7	4.02	2.68	8.04	32.2	1887.1	136.40	0.0506	61000	2.09E-05
653-AL1/45-ST1A	650/45	653.5	45.3	698.8	45	7	4.30	2.87	8.61	34.4	2159.9	156.18	0.0442	61000	2.09E-05
679-AL1/86-ST1A	680/85	678.6	86.0	764.5	54	19	4.00	2.40	12.0	36.0	2549.7	206.56	0.0426	68000	1.94E-05
1046-AL1/45-ST1A	1045/45	1045.6	45.3	1090.9	72	7	4.30	2.87	8.61	43.0	3248.2	218.92	0.0277	60000	2.17E-05

表 B-24　　钢芯铝合金绞线（德国）

代码	老代码	面积			根数		单线直径		直径		单位长度质量	额定拉断力	直流电阻	弹性系数	膨胀系数
		铝	钢	总数			铝	钢	芯	导体					
		(mm^2)	(mm^2)	(mm^2)	铝	钢	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/km)	(kN)	(Ω/km)	(N/mm^2)	(1/K)
15-AL3/3-ST1A	16/2.5	15.3	2.54	17.8	6	1	1.80	1.80	1.80	5.40	61.6	7.48	2.1602	81000	1.92E-05
24-AL3/4-ST1A	25/4	23.9	3.98	27.8	6	1	2.25	2.25	2.25	6.75	96.2	11.69	1.3825	81000	1.92E-05
34-AL3/6-ST1A	35/6	34.4	5.73	40.1	6	1	2.70	2.70	2.70	8.10	138.6	16.66	0.9601	81000	1.92E-05
44-AL3/32-ST1A	44/32	44.0	31.7	75.6	14	7	2.00	2.40	7.20	11.2	369.1	49.08	0.7566	110000	1.50E-05
48-AL3/8-ST1A	50/8	48.3	8.04	56.3	6	1	3.20	3.20	3.20	9.60	194.7	23.08	0.6835	81000	1.92E-05
51-AL3/30-ST1A	50/30	51.2	29.8	81.0	12	7	2.33	2.33	6.99	11.7	374.6	49.12	0.6496	107000	1.53E-05
70-AL3/11-ST1A	70/12	69.9	11.4	81.3	26	7	1.85	1.44	4.32	11.7	282.0	33.96	0.4756	77000	1.89E-05
94-AL3/15-ST1A	95/15	94.4	15.3	109.7	26	7	2.15	1.67	5.01	13.6	380.3	45.79	0.3521	77000	1.89E-05
97-AL3/56-ST1A	95/55	96.5	56.3	152.8	12	7	3.20	3.20	9.60	16.0	706.5	90.40	0.3444	107000	1.53E-05
106-AL3/76-ST1A	105/75	105.7	75.5	181.2	14	19	3.10	2.25	11.3	17.5	885.0	119.56	0.3155	110000	1.50E-05
122-AL3/20-ST1A	120/20	121.6	19.8	141.4	26	7	2.44	1.90	5.70	15.5	490.6	59.09	0.2734	77000	1.89E-05
122-AL3/71-ST1A	120/70	122.1	71.3	193.4	12	7	3.60	3.60	10.8	18.0	894.2	114.41	0.2721	107000	1.53E-05
128-AL3/30-ST1A	125/30	127.9	29.8	157.8	30	7	2.33	2.33	6.99	16.3	586.6	71.76	0.2601	82000	1.78E-05
149-AL3/24-ST1A	150/25	148.9	24.2	173.1	26	7	2.70	2.10	6.30	17.1	600.3	72.28	0.2233	77000	1.89E-05
172-AL3/40-ST1A	170/40	171.8	40.1	211.8	30	7	2.70	2.70	8.10	18.9	787.7	96.36	0.1937	82000	1.78E-05
184-AL3/30-ST1A	185/30	183.8	29.8	213.6	26	7	3.00	2.33	6.99	19.0	740.4	88.24	0.1809	77000	1.89E-05
209-AL3/34-ST1A	210/35	209.1	34.1	243.2	26	7	3.20	2.49	7.47	20.3	843.5	100.54	0.1590	77000	1.89E-05
212-AL3/49-ST1A	210/50	212.1	49.5	261.5	30	7	3.00	3.00	9.00	21.0	972.5	118.96	0.1569	82000	1.78E-05
231-AL3/30-ST1A	230/30	230.9	29.8	260.8	24	7	3.50	2.33	6.99	21.0	870.1	102.14	0.1439	74000	1.96E-05
243-AL3/39-ST1A	240/40	243.1	39.5	282.5	26	7	3.45	2.68	8.04	21.8	979.4	116.72	0.1368	77000	1.89E-05
264-AL3/34-ST1A	265/35	263.7	34.1	297.7	24	7	3.74	2.49	7.47	22.4	993.6	116.64	0.1260	74000	1.96E-05

续表

代码	老代码	面积			根数		单线直径		直径		单位长度质量	额定拉断力	直流电阻	弹性系数	膨胀系数
		铝	钢	总数			铝	钢	芯	导体					
		(mm²)	(mm²)	(mm²)	铝	钢	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/km)	(kN)	(Ω/km)	(N/mm²)	(1/K)
304-AL3/49-ST1A	300/50	304.3	49.5	353.7	26	7	3.86	3.00	9.00	24.4	1226.4	146.16	0.1092	77000	1.89E-05
305-AL3/39-ST1A	305/40	304.6	39.5	344.1	54	7	2.68	2.68	8.04	24.1	1150.3	134.88	0.1093	70000	1.93E-05
339-AL3/30-ST1A	340/30	339.3	29.8	369.1	48	7	3.00	2.33	6.99	25.0	1170.2	134.12	0.0980	62000	2.05E-05
382-AL3/49-ST1A	380/50	381.7	49.5	431.2	54	7	3.00	3.00	9.00	27.0	1441.4	169.01	0.0872	70000	1.93E-05
386-AL3/34-ST1A	385/35	386.0	34.1	420.1	48	7	3.20	2.49	7.47	26.7	1332.4	152.74	0.0862	62000	2.05E-05
434-AL3/56-ST1A	435/55	434.3	56.3	490.6	54	7	3.20	3.20	9.60	28.8	1640.0	190.04	0.0766	70000	1.93E-05
449-AL3/39-ST1A	450/40	448.7	39.5	488.2	48	7	3.45	2.68	8.04	28.7	1547.7	177.39	0.0741	62000	2.05E-05
490-AL3/64-ST1A	490/65	490.3	63.6	553.8	54	7	3.40	3.40	10.2	30.6	1851.4	214.54	0.0679	70000	1.93E-05
550-AL3/71-ST1A	550/70	549.7	71.3	620.9	54	7	3.60	3.60	10.8	32.4	2075.6	240.52	0.0605	70000	1.93E-05
562-AL3/49-ST1A	560/50	561.7	49.5	611.2	48	7	3.86	3.00	9.00	32.2	1937.8	222.11	0.0592	62000	2.05E-05
679-AL3/86-ST1A	680/85	678.6	86.0	764.5	54	19	4.00	2.40	12.0	36.0	2547.6	298.17	0.0490	68000	1.94E-05

表 B-25　　钢芯铝绞线（挪威）

代码	老代码	面积			根数		单线直径		直径		单位长度质量	额定拉断力	直流电阻
		铝	钢	总数			铝	钢	芯	导体			
		(mm²)	(mm²)	(mm²)	铝	钢	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/km)	(kN)	(Ω/km)
27-AL1/9-ST1A	FA 16　8/1	26.7	9.29	36.0	8	1	2.06	3.44	3.44	7.56	145.6	15.02	1.0776
38-AL1/13-ST1A	FA 25　8/1	38.0	13.3	51.3	8	1	2.46	4.11	4.11	9.03	207.7	21.25	0.7557
40-AL1/7-ST1A	FA 25　6/1	39.6	6.61	46.2	6	1	2.90	2.90	2.90	8.70	160.0	14.27	0.7231
52-AL1/30-ST1A	FA 35　12/7	52.5	29.6	82.1	12	7	2.36	2.32	6.96	11.7	376.4	42.92	0.5501
53-AL1/19-ST1A	FA 35　8/1	53.2	18.6	71.8	8	1	2.91	4.86	4.86	10.7	290.5	29.45	0.5400
56-AL1/9-ST1A	FA 35　6/1	55.8	9.29	65.1	6	1	3.44	3.44	3.44	10.3	225.1	19.42	0.5139
79-AL1/46-ST1A	FA 50　12/7	79.3	46.2	125.5	12	7	2.90	2.90	8.70	14.5	580.5	66.18	0.3643
80-AL1/13-ST1A	FA 50　6/1	79.6	13.3	92.9	6	1	4.11	4.11	4.11	12.3	321.4	27.33	0.3600
111-AL1/19-ST1A	FA 70　6/1	111.3	18.6	129.9	6	1	4.86	4.86	4.86	14.6	449.4	38.21	0.2575
112-AL1/65-ST1A	FA 70　12/7	111.5	65.1	176.6	12	7	3.44	3.44	10.3	17.2	816.8	89.97	0.2589
112-AL1/18-ST1A	FA 70　26/7	111.8	18.2	130.0	26	7	2.34	1.82	5.46	14.8	451.2	40.87	0.2583
151-AL1/25-ST1A	FA 95　26/7	151.1	24.7	175.8	26	7	2.72	2.12	6.36	17.2	610.5	54.59	0.1912
151-AL1/35-ST1A	FA 95　30/7	150.8	35.2	186.0	30	7	2.53	2.53	7.59	17.7	692.1	65.76	0.1916
191-AL1/31-ST1A	FA 120　26/7	191.2	31.1	222.3	26	7	3.06	2.38	7.14	19.4	771.6	67.05	0.1510
191-AL1/45-ST1A	FA 120　30/7	191.4	44.7	236.0	30	7	2.85	2.85	8.55	20.0	878.2	83.44	0.1510
239-AL1/39-ST1A	FA 150　26/7	238.8	38.9	277.7	26	7	3.42	2.66	7.98	21.7	963.9	83.76	0.1209
238-AL1/56-ST1A	FA 150　30/7	238.3	55.6	293.9	30	7	3.18	3.18	9.54	22.3	1093.4	100.47	0.1213
293-AL1/48-ST1A	FA 185　26/7	293.3	47.8	341.2	26	7	3.79	2.95	8.85	24.0	1184.3	101.47	0.0985
294-AL1/69-ST1A	FA 185　30/7	293.6	68.5	362.1	30	7	3.53	3.53	10.6	24.7	1347.3	122.33	0.0984
381-AL1/62-ST1A	FA 240　26/7	381.1	62.1	443.2	26	7	4.32	3.36	10.1	27.4	1537.9	129.25	0.0758
381-AL1/87-ST1A	FA 240　30/19	380.8	86.7	467.4	30	19	4.02	2.41	12.1	28.1	1733.6	159.73	0.0760

续表

代码	老代码	面积			根数		单线直径		直径		单位长度质量	额定拉断力	直流电阻
		铝	钢	总数			铝	钢	芯	导体			
		(mm²)	(mm²)	(mm²)	铝	钢	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/km)	(kN)	(Ω/km)
382-AL1/49-ST1A	FA 240 54/7	381.7	49.5	431.2	54	7	3.00	3.00	9.00	27.0	1442.5	121.30	0.0758
402-AL1/52-ST1A	FA 253 GONDOR	402.3	52.2	454.5	54	7	3.08	3.08	9.24	27.7	1520.5	123.75	0.0719
476-AL1/78-ST1A	FA 300 26/7	476.4	77.7	554.1	26	7	4.83	3.76	11.3	30.6	1923.6	161.72	0.0606
477-AL1/109-ST1A	FA 300 30/19	477.1	108.8	585.9	30	19	4.50	2.70	13.5	31.5	2173.7	200.36	0.0606
476-AL1/62-ST1A	FA 300 54/7	476.0	61.7	537.7	54	7	3.35	3.35	10.1	30.2	1798.8	146.40	0.0608
525-AL1/68-ST1A	FA 329 CURLEW	525.5	68.1	593.6	54	7	3.52	3.52	10.6	31.7	1986.0	159.01	0.0550
565-AL1/72-ST1A	FA 354 FINCH	565.0	71.6	636.6	54	19	3.65	2.19	11.0	32.9	2123.0	174.14	0.0512
606-AL1/77-ST1A	FA380 GRACKLE	606.0	76.9	682.9	54	19	3.78	2.27	11.4	34.0	2278.0	184.62	0.0477
645-AL1/82-ST1A	FA405 HEASANT	645.1	81.7	726.8	54	19	3.90	2.34	11.7	35.1	2423.8	196.36	0.0448
766-AL1/97-ST1A	FA 481 PARROT	766.1	97.0	863.1	54	19	4.25	2.55	12.8	38.3	2878.3	233.19	0.0377
806-AL1/102-ST1A	FA 506 FALCON	806.2	102.4	908.7	54	19	4.36	2.62	13.1	39.3	3031.7	245.77	0.0358
1223-AL1/307-ST1A	FA 770	1222.7	306.9	1529.7	72	37	4.65	3.25	22.8	50.7	5796.3	533.27	0.0237

表 B-26 钢芯铝绞线（西班牙）

代码	老代码	面积			根数		单线直径		直径		单位长度质量	额定拉断力	直流电阻
		铝	钢	总数			铝	钢	芯	导体			
		(mm²)	(mm²)	(mm²)	铝	钢	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/km)	(kN)	(Ω/km)
27-AL 1/4-ST1A	LA 30	26.7	4.45	31.1	6	1	2.38	2.38	2.38	7.14	107.8	9.74	1.0736
47-AL 1/8-ST1A	LA 56	46.8	7.79	54.6	6	1	3.15	3.15	3.15	9.45	188.8	16.29	0.6129
67-AL 1/11-ST1A	LA 78	67.3	11.2	78.6	6	1	3.78	3.78	3.78	11.3	271.8	23.12	0.4256
94-AL 1/22-ST1A	LA 110	94.2	22.0	116.2	30	7	2.00	2.00	6.00	14.0	432.5	43.17	0.3067
119-AL 1/28-ST1A	LA 145	119.3	27.8	147.1	30	7	2.25	2.25	6.75	15.8	547.4	54.03	0.2423
147-AL 1/34-ST1A	LA 180	147.3	34.4	181.6	30	7	2.50	2.50	7.50	17.5	675.8	64.94	0.1963
242-AL 1/39-ST1A	LA 280 HAWK	241.6	39.5	281.1	26	7	3.44	2.68	8.04	21.8	976.2	84.89	0.1195
337-AL 1/44-ST1A	LA 380 GULL	337.3	43.7	381.0	54	7	2.82	2.82	8.46	25.4	1274.6	107.18	0.0857
402-AL 1/52-ST1A	LA 455 CONDOR	402.3	52.2	454.5	54	7	3.08	3.08	9.24	27.7	1520.5	123.75	0.0719
485-AL 1/63-ST1A	LA545CARDINAL	484.5	62.8	547.3	54	7	3.38	3.38	10.1	30.4	1831.1	149.04	0.0597
565-AL 1/72-ST1A	LA 635 FINCH	565.0	71.6	636.6	54	19	3.65	2.19	11.0	32.9	2123.0	174.14	0.0512

表 B-27 钢芯铝合金绞线（西班牙）

代码	老代码	面积			根数		单线直径		直径		单位长度质量	额定拉断力	直流电阻
		铝	钢	总数			铝	钢	芯	导体			
		(mm²)	(mm²)	(mm²)	铝	钢	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/km)	(kN)	(Ω/km)
27-AL 2/4-ST1A	DA 30	26.7	4.45	31.1	6	1	2.38	2.38	2.38	7.14	107.7	13.75	1.2474
47-AL2/8-ST1A	DA 56	46.8	7.79	54.6	6	1	3.15	3.15	3.15	9.45	188.6	23.77	0.7121
67-AL2/11-ST1A	DA 78	67.3	11.2	78.6	6	1	3.78	3.78	3.78	11.3	271.6	33.55	0.4945
94-AL 2/22-ST1A	DA 110	94.2	22.0	116.2	30	7	2.00	2.00	6.00	14.0	432.2	56.36	0.3563
119-AL2/28-ST1A	DA 145	119.3	27.8	147.1	30	7	2.25	2.25	6.75	15.8	547.0	71.33	0.2815
147-AL 2/34-ST1A	DA180	147.3	34.4	181.6	30	7	2.50	2.50	7.50	17.5	675.3	87.03	0.2280
226-AL 2/53-ST1A	DA 280	226.4	52.8	279.3	30	7	3.10	3.10	9.30	21.7	1038.4	131.71	0.1483

表 B-28　　钢芯铝绞线（瑞士）

代码	老代码	面积			根数		单线直径		直径		单位长度质量	额定拉断力	直流电阻
		铝	钢	总数			铝	钢	芯	导体			
		(mm²)	(mm²)	(mm²)	铝	钢	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/km)	(kN)	(Ω/km)
22-AL1/4-ST1A	—	21.6	3.60	25.2	6	1	2.14	2.14	2.14	6.42	87.1	8.09	1.3279
30-AL1/5-ST1A	—	29.9	5.0	34.9	6	1	2.52	2.52	2.52	7.56	120.8	10.77	0.9576
43-AL1/7-ST1A	—	43.0	7.2	50.1	6	1	3.02	3.02	3.02	9.06	173.5	14.97	0.6668
60-AL1/10-ST1A	—	59.7	10.0	69.7	6	1	3.56	3.56	3.56	10.7	241.1	20.50	0.4798
79-AL1/18-ST1A	—	78.9	18.4	97.3	3	7	1.83	1.83	5.49	12.8	362.1	36.14	0.3663
97-AL1/23-ST1A	—	97.1	22.7	119.8	30	7	2.03	2.03	6.09	14.2	445.6	43.98	0.2977
121-AL1/28-ST1A	—	121.4	28.3	149.7	30	7	2.27	2.27	6.81	15.9	557.1	53.54	0.2381
150-AL1/35-ST1A	—	149.6	34.9	184.5	30	7	2.52	2.52	7.56	17.6	686.6	65.24	0.1932
194-AL1/45-ST1A	—	194.1	45.3	239.4	30	7	2.87	2.87	8.61	20.1	890.6	84.62	0.1489
212-AL1/49-ST1A	—	212.1	49.5	261.5	30	7	3.00	3.00	9.00	21.0	973.1	92.46	0.1363
244-AL1/57-ST1A	—	244.3	57.0	301.3	30	7	3.22	3.22	9.66	22.5	1121.1	103.01	0.1183
282-AL1/66-ST1A	—	282.1	65.8	347.9	30	7	3.46	3.46	10.4	24.2	1294.4	118.94	0.1025
357-AL1/46-ST1A	—	356.7	46.2	402.9	54	7	2.90	2.90	8.70	26.1	1348.0	113.35	0.0811
440-AL1/57-ST1A	—	439.7	57.0	496.7	54	7	3.22	3.22	9.66	29.0	1661.9	135.26	0.0658
487-AL1/63-ST1A	—	487.4	63.2	550.6	54	7	3.39	3.39	10.2	30.5	1842.0	149.92	0.0593
531-AL1/69-ST1A	—	531.5	68.9	600.4	54	7	3.54	3.54	10.6	31.9	2008.6	160.82	0.0544
748-AL1/97-ST1A	—	748.1	97.0	845.2	96	19	3.15	2.55	12.8	38.0	2832.9	234.06	0.0387

表 B-29　　钢芯铝合金绞线（瑞士）

代码	老代码	面积			根数		单线直径		直径		单位长度质量	额定拉断力	直流电阻
		铝	钢	总数			铝	钢	芯	导体			
		(mm²)	(mm²)	(mm²)	铝	钢	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/km)	(kN)	(Ω/km)
14-AL3/4-ST1A	—	13.6	2.27	15.9	6	1	1.70	1.70	1.70	5.10	54.9	6.67	2.4218
22-AL3/4-ST1A	—	21.6	3.60	25.2	6	1	2.14	2.14	2.14	6.42	87.1	10.57	1.5283
30-AL3/5-ST1A	—	29.9	4.99	34.9	6	1	2.52	2.52	2.52	7.56	120.7	14.51	1.1021
43-AL3/7-ST1A	—	43.0	7.16	50.1	6	1	3.02	3.02	3.02	9.06	173.4	20.56	0.7674
60-AL3/10-ST1A	—	59.7	10.0	69.7	6	1	3.56	3.56	3.56	10.7	240.9	28.57	0.5523
79-AL3/18-ST1A	—	78.9	18.4	97.3	30	7	1.83	1.83	5.49	12.8	361.8	44.82	0.4216
97-AL3/23-ST1A	—	97.1	22.7	119.8	30	7	2.03	2.03	6.09	14.2	445.3	55.15	0.3426
121-AL3/28-ST1A	—	121.4	28.3	149.7	30	7	2.27	2.27	6.81	15.9	556.8	68.11	0.2740
150-AL3/35-ST1A	—	149.6	34.9	184.5	30	7	2.52	2.52	7.56	17.6	686.2	83.94	0.2223
194-AL3/45-ST1A	—	194.1	45.3	239.4	30	7	2.87	2.87	8.61	20.1	890.0	108.88	0.1714
212-AL3/49-ST1A	—	212.1	49.5	261.5	30	7	3.00	3.00	9.00	21.0	972.5	118.96	0.1569
244-AL3/57-ST1A	—	244.3	57.0	301.3	30	7	3.22	3.22	9.66	22.5	1120.3	134.77	0.1362
282-AL3/66-ST1A	—	282.1	65.8	347.9	30	7	3.46	3.46	10.38	24.2	1293.5	155.61	0.1179
357-AL3/46-ST1A	—	356.7	46.2	402.9	54	7	2.90	2.90	8.70	26.1	1346.9	157.93	0.0933
440-AL3/57-ST1A	—	439.7	57.0	496.7	54	7	3.22	3.22	9.66	29.0	1660.5	192.43	0.0757
487-AL3/63-ST1A	—	487.4	63.2	550.6	54	7	3.39	3.39	10.17	30.5	1840.5	213.28	0.0683
531-AL3/69-ST1A	—	531.5	68.9	600.4	54	7	3.54	3.54	10.62	31.9	2007.0	232.57	0.0626
748-AL3/97-ST1A	—	748.1	97.0	845.2	96	19	3.15	2.55	12.75	38.0	2830.6	331.32	0.0446

表 B-30　钢芯铝绞线（瑞典）

代码	老代码	面积			根数		单线直径		直径		单位长度质量	额定拉断力	直流电阻
		铝	钢	总数			铝	钢	芯	导体			
		(mm²)	(mm²)	(mm²)	铝	钢	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/km)	(kN)	(Ω/km)
54-AL1/9-ST1A	RAVEN	53.5	8.92	62.4	6	1	3.37	3.37	3.37	10.1	216.1	18.64	0.5355
85-AL1/14-ST1A	PIGEON	85.1	14.2	99.3	6	1	4.25	4.25	4.25	12.8	343.6	29.22	0.3367
135-AL1/22-ST1A	PARTRIDGE	134.9	22.0	156.9	26	7	2.57	2.00	6.00	16.3	544.5	48.66	0.2141
201-AL1/33-ST1A	IBIS	201.3	32.7	234.1	26	7	3.14	2.44	7.32	19.9	812.1	70.53	0.1434
283-AL1/46-ST1A	DOVE	282.6	45.9	328.5	26	7	3.72	2.89	8.67	23.6	1139.6	97.56	0.1022
402-AL1/52-ST1A	CONDOR	402.3	52.2	454.5	54	7	3.08	3.08	9.24	27.7	1520.5	123.75	0.0719
525-AL1/68-ST1A	CURLEW	525.5	68.1	593.6	54	7	3.52	3.52	10.6	31.7	1986.0	159.01	0.0550
685-AL1/89-ST1A	SKATA	685.4	88.8	774.2	54	7	4.02	4.02	12.1	36.2	2590.2	207.39	0.0422
806-AL1/102-ST1A	FALCON	806.2	102.4	908.7	54	19	4.36	2.62	13.1	39.3	3031.7	245.77	0.0358
563-AL1/29-ST1A	MORKULLA	562.7	29.3	592.0	42	7	4.13	2.31	6.93	31.7	1783.7	123.47	0.0513
735-AL1/38-ST1A	RIPA	734.9	38.0	772.9	42	7	4.72	2.63	7.89	36.2	2327.5	160.93	0.0393
865-AL1/44-ST1A	ORRE	864.7	44.0	908.8	42	7	5.12	2.83	8.49	39.2	2733.1	188.55	0.0334
89-AL1/52-ST1A	DOTTEREL	89.4	52.2	141.6	12	7	3.08	3.08	9.24	15.4	654.8	72.12	0.3230
117-AL1/68-ST1A	ODEN	116.8	68.1	184.9	12	7	3.52	3.52	10.6	17.6	855.2	93.62	0.2473
152-AL1/89-ST1A	ATLE	152.3	88.8	241.2	12	7	4.02	4.02	12.1	20.1	1115.4	122.10	0.1896
251-AL1/65-ST1A	YMER	251.0	64.7	315.6	32	7	3.16	3.43	10.3	22.9	1199.8	112.56	0.1152

表 B-31　铝绞线（英国）

代码	老代码	截面积	绞合根数	直径		单位长度质量	额定拉断力	直流电阻
				线径	导体			
		(mm²)		(mm)	(mm)	(kg/km)	(kN)	(Ω/km)
23-AL1	MIDGE	23.3	7	2.06	6.18	63.8	4.20	1.2449
27-AL1	GNAT	26.9	7	2.21	6.63	73.4	4.83	1.0643
37-AL1	MOSQUITO	36.9	7	2.59	7.77	100.8	6.27	0.7749
43-AL1	LADYBIRD	42.8	7	2.79	8.37	117.0	7.28	0.6678
53-AL1	ANT	52.8	7	3.10	9.30	144.4	8.72	0.5409
64-AL1	FLY	63.6	7	3.40	10.2	173.7	10.49	0.4497
74-AL1	BLUEBOTTLE	73.6	7	3.66	11.0	201.3	11.78	0.3880
79-AL1	EARWIG	78.6	7	3.78	11.3	214.7	12.57	0.3638
84-AL1	GRASSHOPPER	84.1	7	3.91	11.7	229.7	13.45	0.3400
96-AL1	CLEGG	95.6	7	4.17	12.5	261.3	15.30	0.2989
106-AL1	WASP	106.0	7	4.39	13.2	289.6	16.95	0.2697
106-AL1	BEETLE	106.4	19	2.67	13.4	292.4	18.08	0.2701
132-AL1	BEE	132.0	7	4.90	14.7	360.8	21.12	0.2165
158-AL1	HORNET	157.6	19	3.25	16.3	433.2	26.01	0.1823
186-AL1	CATERPILLAR	185.9	19	3.53	17.7	511.1	29.75	0.1546
213-AL1	CHAFER	213.2	19	3.78	18.9	586.0	34.12	0.1348

续表

代码	老代码	截面积	绞合根数	直径		单位长度质量	额定拉断力	直流电阻
				线径	导体			
		(mm²)		(mm)	(mm)	(kg/km)	(kN)	(Ω/km)
238-AL1	SPIDER	237.6	19	3.99	20.0	652.9	38.01	0.1210
266-AL1	COCKROACH	265.7	19	4.22	21.1	730.4	42.52	0.1081
323-AL1	BUTTERFLY	322.7	19	4.65	23.3	886.8	51.63	0.0891
373-AL1	MOTH	373.1	19	5.00	25.0	1025.3	59.69	0.0770
372-AL1	DRONE	372.4	37	3.58	25.1	1027.1	59.59	0.0774
415-AL1	CENTIPEDE	415.2	37	3.78	26.5	1145.1	66.43	0.0695
486-AL1	MAYBUG	486.1	37	4.09	28.6	1340.6	77.78	0.0593
530-AL1	SCORPION	529.8	37	4.27	29.9	1461.2	84.77	0.0544
628-AL1	CICADA	628.3	37	4.65	32.6	1732.9	100.54	0.0459

表 B-32　　铝合金绞线（英国）

代码	老代码	截面积	绞合根数	直径		单位长度质量	额定拉断力	直流电阻
				线径	导体			
		(mm²)		(mm)	(mm)	(kg/km)	(kN)	(Ω/km)
19-AL3	BOX	18.8	7	1.85	5.55	51.4	5.55	1.7480
24-AL3	ACACIA	23.8	7	2.08	6.24	64.9	7.02	1.3828
30-AL3	ALMOND	30.1	7	2.34	7.02	82.2	8.88	1.0926
35-AL3	CEDAR	35.5	7	2.54	7.62	96.8	10.46	0.9273
42-AL3	DEODAR	42.2	7	2.77	8.31	115.2	12.44	0.7797
48-AL3	FIR	47.8	7	2.95	8.85	130.6	14.11	0.6875
60-AL3	HAZEL	59.9	7	3.30	9.90	163.4	17.66	0.5494
72-AL3	PINE	71.6	7	3.61	10.8	195.6	21.14	0.4591
84-AL3	HOLLY	84.1	7	3.91	11.7	229.5	24.79	0.3913
90-AL3	WILLOW	89.7	7	4.04	12.1	245.0	26.47	0.3665
119-AL3	OAK	118.9	7	4.65	14.0	324.5	35.07	0.2767
151-AL3	MULBERRY	150.9	19	3.18	15.9	414.3	44.52	0.2192
181-AL3	ASH	180.7	19	3.48	17.4	496.1	53.31	0.1830
211-AL3	ELM	211.0	19	3.76	18.8	579.2	62.24	0.1568
239-AL3	POPLAR	239.4	37	2.87	20.1	659.4	70.61	0.1387
303-AL3	SYCAMORE	303.2	37	3.23	22.6	835.2	89.40	0.1095
362-AL3	UPAS	362.1	37	3.53	24.7	997.5	106.82	0.0917
479-AL3	YEW	479.0	37	4.06	28.4	1319.6	141.31	0.0693
498-AL3	TOTARA	498.1	37	4.14	29.0	1372.1	146.93	0.0666
587-AL3	RUBUS	586.9	61	3.50	31.5	1622.0	173.13	0.0567
659-AL3	SORBUS	659.4	61	3.71	33.4	1822.5	194.53	0.0505
821-AL3	ARAUCARIA	821.1	61	4.14	37.3	2269.4	242.24	0.0406
996-AL3	REDWOOD	996.2	61	4.56	41.0	2753.2	293.88	0.0334

表 B-33 　　　　铝合金绞线（英国）

代码	老代码	截面积	绞合根数	直径		单位长度质量	额定拉断力	直流电阻
				线径	导体			
		(mm²)		(mm)	(mm)	(kg/km)	(kN)	(Ω/km)
239-AL5	POPLAR	239.4	37	2.87	20.1	659.4	70.61	0.1330
303-AL5	SYCAMORE	303.2	37	3.23	22.6	835.2	89.44	0.1050
362-AL5	UPAS	362.1	37	3.53	24.7	997.5	106.82	0.0879
479-AL5	YEW	479.0	37	4.06	28.4	1319.6	141.31	0.0665
498-AL5	TOTARA	498.1	37	4.14	29.0	1372.1	146.93	0.0639
587-AL5	RUBUS	586.9	61	3.50	31.5	1622.0	173.13	0.0544
659-AL5	SORBUS	659.4	61	3.71	33.4	1822.5	194.53	0.0484
821-AL5	ARAUCARIA	821.1	61	4.14	37.3	2269.4	242.24	0.0389
996-AL5	REDWOOD	996.2	61	4.56	41.0	2753.2	293.88	0.0321

表 B-34 　　　　钢芯铝绞线（英国）

代码	老代码	面积			根数		单线直径		直径		单位长度质量	额定拉断力	直流电阻
		铝	钢	总数			铝	钢	芯	导体			
		(mm²)	(mm²)	(mm²)	铝	钢	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/km)	(kN)	(Ω/km)
11-AL1/2-ST1A	MOLE	10.6	1.77	12.4	6	1	1.50	1.50	1.50	4.50	42.8	4.14	2.7027
21-AL1/3-ST1A	SQUIRREL	21.0	3.50	24.5	6	1	2.11	2.11	2.11	6.33	84.7	7.87	1.3659
26-AL1/4-ST1A	GOPHER	26.2	4.37	30.6	6	1	2.36	2.36	2.36	7.08	106.0	9.58	1.0919
32-AL1/5-ST1A	WEASEL	31.6	5.27	36.9	6	1	2.59	2.59	2.59	7.77	127.6	11.38	0.9065
37-AL1/6-ST1A	FOX	36.7	6.11	42.8	6	1	2.79	2.79	2.79	8.37	148.1	13.21	0.7812
42-AL1/7-ST1A	FERRET	42.4	7.07	49.5	6	1	3.00	3.00	3.00	9.00	171.2	15.27	0.6757
53-AL1/9-ST1A	RABBIT	52.9	8.81	61.7	6	1	3.35	3.35	3.35	10.1	213.5	18.42	0.5419
63-AL1/11-ST1A	MINK	63.1	10.5	73.6	6	1	3.66	3.66	3.66	11.0	254.9	21.67	0.4540
63-AL1/37-ST1A	SKUNK	63.2	36.9	100.1	12	7	2.59	2.59	7.77	13.0	463.0	52.79	0.4568
75-AL1/13-ST1A	BEAVER	75.0	12.5	87.5	6	1	3.99	3.99	3.99	12.0	302.9	25.76	0.3820
73-AL1/43-ST1A	HORSE	73.4	42.8	116.2	12	7	2.79	2.79	8.37	14.0	537.3	61.26	0.3936
79-AL1/13-ST1A	RACOON	78.8	13.1	92.0	6	1	4.09	4.09	4.09	12.3	318.3	27.06	0.3635
84-AL1/14-ST1A	OTTER	83.9	14.0	97.9	6	1	4.22	4.22	4.22	12.7	338.8	28.81	0.3415
95-AL1/16-ST1A	CAT	95.4	15.9	111.3	6	1	4.50	4.50	4.50	13.5	385.3	32.76	0.3003
105-AL1/17-ST1A	HARE	105.0	17.5	122.5	6	1	4.72	4.72	4.72	14.2	423.8	36.04	0.2730
105-AL1/14-ST1A	DOG	105.0	13.6	118.5	6	7	4.72	1.57	4.71	14.2	394.0	32.65	0.2733
132-AL1/20-ST1A	COYOTE	131.7	20.1	151.8	26	7	2.54	1.91	5.73	15.9	520.7	45.86	0.2192
132-AL1/7-ST1A	COUGAR	131.5	7.31	138.8	18	1	3.05	3.05	3.05	15.3	418.8	29.74	0.2188
131-AL1/31-ST1A	TIGER	131.2	30.6	161.9	30	7	2.36	2.36	7.08	16.5	602.2	57.87	0.2202
158-AL1/37-ST1A	WOLF	158.1	36.9	194.9	30	7	2.59	2.59	7.77	18.1	725.3	68.91	0.1829
159-AL1/9-ST1A	DINGO	158.7	8.81	167.5	18	1	3.35	3.35	3.35	16.8	505.2	35.87	0.1814
183-AL1/43-ST1A	LYNX	183.4	42.8	226.2	30	7	2.79	2.79	8.37	19.5	841.6	79.97	0.1576
184-AL1/10-ST1A	CARACAL	184.2	10.2	194.5	18	1	3.61	3.61	3.61	18.1	586.7	40.74	0.1562

续表

代码	老代码	面积			根数		单线直径		直径		单位长度质量	额定拉断力	直流电阻
		铝	钢	总数			铝	钢	芯	导体			
		(mm²)	(mm²)	(mm²)	铝	钢	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/km)	(kN)	(Ω/km)
212-AL1/49-ST1A	PANTHER	212.1	49.5	261.5	30	7	3.00	3.00	9.00	21.0	973.1	92.46	0.1363
211-AL1/12-ST1A	JAGUAR	210.6	11.7	222.3	18	1	3.86	3.86	3.86	19.3	670.8	46.57	0.1366
238-AL1/56-ST1A	LION	238.3	55.6	293.9	30	7	3.18	3.18	9.54	22.3	1093.4	100.47	0.1213
264-AL1/62-ST1A	BEAR	264.4	61.7	326.1	30	7	3.35	3.35	10.1	23.5	1213.4	111.50	0.1093
324-AL1/76-ST1A	GOAT	324.3	75.7	400.0	30	7	3.71	3.71	11.1	26.0	1488.2	135.13	0.0891
375-AL1/88-ST1A	SHEEP	375.1	87.5	462.6	30	7	3.99	3.99	12.0	27.9	1721.3	156.30	0.0771
374-AL1/48-ST1A	ANTELOPE	374.1	48.5	422.6	54	7	2.97	2.97	8.91	26.7	1413.8	118.88	0.0773
382-AL1/49-ST1A	BISON	381.7	49.5	431.2	54	7	3.00	3.00	9.00	27.0	1442.5	121.30	0.0758
430-AL1/100-ST1A	DEER	429.6	100.2	529.8	30	7	4.27	4.27	12.8	29.9	1971.4	179.00	0.0673
429-AL1/56-ST1A	ZEBRA	428.9	55.6	484.5	54	7	3.18	3.18	9.54	28.6	1620.8	131.92	0.0674
477-AL1/111-ST1A	ELK	477.1	111.3	588.5	30	7	4.50	4.50	13.5	31.5	2189.5	198.80	0.0606
476-AL1/62-ST1A	CAMEL	476.0	61.7	537.7	54	7	3.35	3.35	10.1	30.2	1798.8	146.40	0.0608
528-AL1/69-ST1A	MOOSE	528.5	68.5	597.0	54	7	3.53	3.53	10.6	31.8	1997.3	159.92	0.0547

表 B-35　　钢芯铝合金绞线（英国）

代码	老代码	面积			根数		单线直径		直径		单位长度质量	额定拉断力	直流电阻
		铝	钢	总数			铝	钢	芯	导体			
		(mm²)	(mm²)	(mm²)	铝	钢	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/km)	(kN)	(Ω/km)
183-AL5/43-ST1A	KEZIAH	183.4	42.8	226.2	30	7	2.79	2.79	8.37	19.5	841.6	102.89	0.1740

表 B-36　　钢芯铝绞线（意大利）

代码	老代码	面积			根数		单线直径		直径		单位长度质量	额定拉断力	直流电阻
		铝	钢	总数			铝	钢	芯	导体			
		(mm²)	(mm²)	(mm²)	铝	钢	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/km)	(kN)	(Ω/km)
42-AL1/7-ST1A	42/6+1	42.4	7.07	49.5	6	1	3.00	3.00	3.00	9.00	171.2	15.27	0.6757
68-AL1/39-ST1A	68/12+7	67.7	39.5	107.2	12	7	2.68	2.68	8.04	13.4	495.8	56.52	0.4266
128-AL1/21-ST1A	128/26+7	127.6	20.9	148.5	26	7	2.50	1.95	5.85	15.9	516.0	46.79	0.2263
191-AL1/31-ST1A	191/26+7	191.2	31.1	222.3	26	7	3.06	2.38	7.14	19.4	771.6	67.05	0.1510
212-AL1/49-ST1A	212/30+7	212.1	49.5	261.5	30	7	3.00	3.00	9.00	21.0	973.1	92.46	0.1363
265-AL1/43-ST1A	265/26+7	264.6	43.1	307.8	26	7	3.60	2.80	8.40	22.8	1068.0	91.48	0.1091
349-AL1/79-ST1A	349/30+19	349.2	78.9	428.2	30	19	3.85	2.30	11.5	26.9	1585.7	145.87	0.0828
382-AL1/49-ST1A	382/54+7	381.7	49.5	431.2	54	7	3.00	3.00	9.00	27.0	1442.5	121.30	0.0758
416-AL1/93-ST1A	416/30+19	415.6	93.3	508.9	30	19	4.20	2.50	12.5	29.3	1881.8	172.82	0.0696
434-AL1/56-ST1A	434/54+7	434.3	56.3	490.6	54	7	3.20	3.20	9.60	28.8	1641.3	133.59	0.0666
520-AL1/66-ST1A	520/54+19	519.5	65.8	585.3	54	19	3.50	2.10	10.5	31.5	1952.1	162.72	0.0556
629-AL1/79-ST1A	629/54+19	628.6	78.9	707.6	54	19	3.85	2.30	11.5	34.6	2356.6	190.58	0.0460

续表

代码	老代码	面积			根数		单线直径		直径		单位长度质量	额定拉断力	直流电阻
		铝	钢	总数			铝	钢	芯	导体			
		(mm²)	(mm²)	(mm²)	铝	钢	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/km)	(kN)	(Ω/km)
748-AL1/93-ST1A	748/54+19	748.1	93.3	841.4	54	19	4.20	2.50	12.5	37.7	2799.3	226.03	0.0386
859-AL1/109-ST1A	858/54+19	858.8	108.8	967.6	54	19	4.50	2.70	13.5	40.5	3226.9	261.43	0.0337
1657-AL1/209-ST1A	1657/150+37	1656.7	208.7	1865.4	150	37	3.75	2.68	18.8	56.3	6222.4	503.01	0.0175
42-AL1/7-ST3D	42/6+1	42.4	7.07	49.5	6	1	3.00	3.00	3.00	9.00	171.2	14.99	0.6757
68-AL1/39-ST3D	68/12+7	67.7	39.5	107.2	12	7	2.68	2.68	8.04	13.4	495.8	59.29	0.4266
128-AL1/21-ST3D	128/26+7	127.6	20.9	148.5	26	7	2.50	1.95	5.85	15.9	516.0	47.63	0.2263
191-AL1/31-ST3D	191/26+7	191.2	31.1	222.3	26	7	3.06	2.38	7.14	19.4	771.6	69.23	0.1510
212-AL1/49-ST3D	212/30+7	212.1	49.5	261.5	30	7	3.00	3.00	9.00	21.0	973.1	90.48	0.1363
265-AL1/43-ST3D	265/26+7	264.6	43.1	307.8	26	7	3.60	2.80	8.40	22.8	1068.0	89.76	0.1091
349-AL1/79-ST3D	349/30+19	349.2	78.9	428.2	30	19	3.85	2.30	11.5	26.9	1585.7	151.40	0.0828
382-AL1/49-ST3D	382/54+7	381.7	49.5	431.2	54	7	3.00	3.00	9.00	27.0	1442.5	119.32	0.0758
416-AL1/93-ST3D	416/30+19	415.6	93.3	508.9	30	19	4.20	2.50	12.5	29.3	1881.8	179.35	0.0696
434-AL1/56-ST3D	434/54+7	434.3	56.3	490.6	54	7	3.20	3.20	9.60	28.8	1641.3	133.59	0.0666
520-AL1/66-ST3D	520/54+19	519.5	65.8	585.3	54	19	3.50	2.10	10.5	31.5	1952.1	165.35	0.0556
629-AL1/79-ST3D	629/54+19	628.6	78.9	707.6	54	19	3.85	2.30	11.5	34.6	2356.6	196.10	0.0460
748-AL1/93-ST3D	748/54+19	748.1	93.3	841.4	54	19	4.20	2.50	12.5	37.7	2799.3	232.55	0.0386
859-AL1/109-ST3D	858/54+19	858.8	108.8	967.6	54	19	4.50	2.70	13.5	40.5	3226.9	269.04	0.0337
1657-AL1/209-ST3D	1657/150+37	1656.7	208.7	1865.4	150	37	3.75	2.68	18.8	56.3	6222.4	517.62	0.0175
42-AL1/7-ST4A	42/6+1	42.4	7.07	49.5	6	1	3.00	3.00	3.00	9.00	171.2	16.22	0.6757
68-AL1/39-ST4A	68/12+7	67.7	39.5	107.2	12	7	2.68	2.68	8.04	13.4	495.8	61.85	0.4266
128-AL1/21-ST4A	128/26+7	127.6	20.9	148.5	26	7	2.50	1.95	5.85	15.9	516.0	48.99	0.2263
191-AL1/31-ST4A	191/26+7	191.2	31.1	222.3	26	7	3.06	2.38	7.14	19.4	771.6	71.25	0.1510
212-AL1/49-ST4A	212/30+7	212.1	49.5	261.5	30	7	3.00	3.00	9.00	21.0	973.1	99.14	0.1363
265-AL1/43-ST4A	265/26+7	264.6	43.1	307.8	26	7	3.60	2.80	8.40	22.8	1068.0	97.30	0.1091
349-AL1/79-ST4A	349/30+19	349.2	78.9	428.2	30	19	3.85	2.30	11.5	26.9	1585.7	156.53	0.0828
382-AL1/49-ST4A	382/54+7	381.7	49.5	431.2	54	7	3.00	3.00	9.00	27.0	1442.5	127.98	0.0758
416-AL1/93-ST4A	416/30+19	415.6	93.3	508.9	30	19	4.20	2.50	12.5	29.3	1881.8	185.42	0.0696
434-AL1/56-ST4A	434/54+7	434.3	56.3	490.6	54	7	3.20	3.20	9.60	28.8	1641.3	140.62	0.0666
520-AL1/66-ST4A	520/54+19	519.5	65.8	585.3	54	19	3.50	2.10	10.5	31.5	1952.1	169.63	0.0556
629-AL1/79-ST4A	629/54+19	628.6	78.9	707.6	54	19	3.85	2.30	11.5	34.6	2356.6	201.23	0.0460
748-AL1/93-ST4A	748/54+19	748.1	93.3	841.4	54	19	4.20	2.50	12.5	37.7	2799.3	238.62	0.0386
859-AL1/109-ST4A	858/54+19	858.8	108.8	967.6	54	19	4.50	2.70	13.5	40.5	3226.9	276.11	0.0337
1657-AL1/209-ST4A	1657/150+37	1656.7	208.7	1865.4	150	37	3.75	2.68	18.8	56.3	6222.4	531.19	0.0175

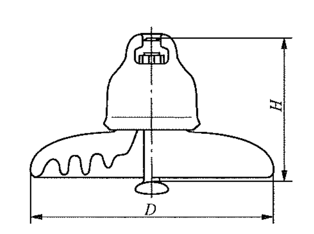
表 B-37　　钢芯铝绞线（葡萄牙）

代码	老代码	面积			根数		单线直径		直径		单位长度质量	额定拉断力	直流电阻
		铝	钢	总数			铝	钢	芯	导体			
		(mm²)	(mm²)	(mm²)	铝	钢	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/km)	(kN)	(Ω/km)
26-AL1/4-ST1A	30	26.25	4.37	30.62	6	1	2.36	2.36	2.36	7.08	106.7	9.34	1.0932
42-AL1/7-ST1A	50	42.41	7.07	49.48	6	1	3	3	3.00	9.00	172.4	14.93	0.6765
80-AL1/13-ST1A	90	75.40	12.57	87.96	6	1	4	4	4.00	12.00	306.4	25.28	0.3806
80-AL1/476-ST1A	Guinea 130	80.36	46.88	127.24	12	7	2.92	2.92	8.76	14.60	588.4	66.46	0.3598
96-AL1/56-ST1A	Dorking 153	96.51	56.30	152.81	12	7	3.2	3.2	9.60	16.00	706.7	77.08	0.2992
94-AL1/22-ST1A	Canna 116	94.25	21.99	116.24	30	7	2	2	6.00	14.00	432.2	42.41	0.3065
203-AL1/33-ST1A	235	202.62	32.46	235.08	26	7	3.15	2.43	7.29	19.89	813.3	68.82	0.1425
136-AL1/22-ST1A	Partridge 160	135.93	21.99	157.92	26	7	2.58	2	6.00	16.32	547.3	47.75	0.2124
212-AL1/49-ST1A	Panther 260	212.06	49.48	261.54	30	7	3	3	9.00	21.00	972.4	90.76	0.1362
264-AL1/62-ST1A	Bear 325	264.42	61.70	326.12	30	7	3.35	3.35	10.05	23.45	1212.6	109.38	0.1093
429-AL1/56-ST1A	Zebra 485	428.88	55.60	484.48	54	7	3.18	3.18	9.54	28.62	1618.9	128.49	0.0674
565-AL1/30-ST1A	Zambeze 595	565.38	29.59	594.97	42	7	4.14	2.32	6.96	31.80	1792.4	119.67	0.0511

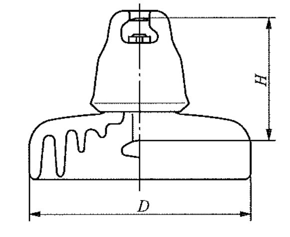
附录C 绝 缘 子

C.1 盘形绝缘子技术数据

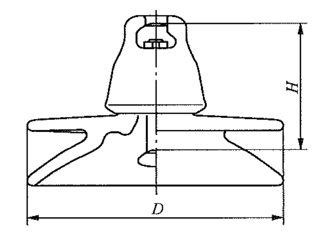
盘形绝缘子型式如图C-1～图C-6所示。盘形绝缘子技术数据见表C-1～表C-12。



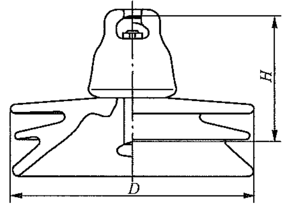
图C-1 普通型盘形绝缘子



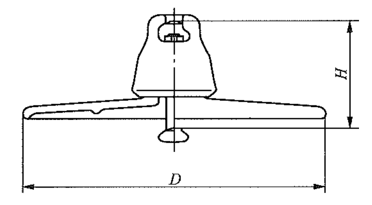
图C-2 钟罩型盘形绝缘子



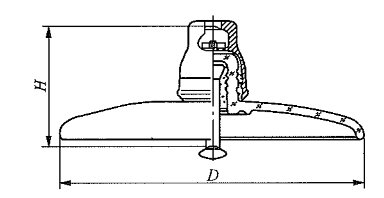
图C-3 双伞型盘形绝缘子



图C-4 三伞型盘形绝缘子



图C-5 草帽型盘形绝缘子



图C-6 空气动力型盘形绝缘子

表C-1 **70kN 盘形绝缘子**

厂家序号	产品型号	图号	盘径（mm）	高度（mm）	泄漏距离（mm）	耐受电压有效值（kV）			工频击穿电压幅值（kV）	额定机电破坏（kN）	例行拉伸负荷（kN）	质量（kg）	符合标准
						干	湿	冲击					
1	U70B/127	普通型	254	127	320	70	40	110	110	70	35	4.5	IEC GB
	U70B/146	普通型	254	146	320	70	40	110	110	70	35	4.5	
	U70BP/146D	双伞型	280	146	450	75	40	110	120	70	35	7.5	
	U70BP/160D	双伞型	280	160	450	75	40	110	120	70	35	7.5	
	U70BP/155T	三伞型	320	155	550	85	45	120	120	70	35	11.0	
2	XP-70	普通型	255	146	295	70	40	100	110	70	35	4.6	IEC BS AS ANSI
	XP1-70	普通型	255	127	295	70	40	100	110	70	35	4.6	
	XP6-70	普通型	255	146	320	70	40	100	110	70	35	4.8	
	XP9-70	普通型	255	146	370	70	40	100	110	70	35	5.5	
	XHP-70	钟罩型	255	146	432	80	42	120	120	70	35	7.0	
	XMP-70	草帽型	350	146	300	70	40	105	120	70	35	5.7	
	XWP1-70	双伞型	255	160	400	80	42	120	120	70	35	5.9	
	XWP2-70	双伞型	255	146	400	80	42	120	120	70	35	5.9	
	XWP3-70	双伞型	280	160	450	80	42	120	120	70	35	6.7	
	XWP6-70	双伞型	255	146	450	80	42	120	120	70	35	6.4	
	XWP8-70	双伞型	280	146	450	80	42	120	120	70	35	7.5	
	XSP-70	三伞型	255	146	450	80	42	120	120	70	35	6.3	
	XSP1-70	三伞型	280	146	450	80	45	120	120	70	35	7.1	
	XSP3-70	三伞型	320	160	550	80	45	120	120	70	35	9.1	

续表

厂家序号	产品型号	图号	盘径（mm）	高度（mm）	泄漏距离（mm）	耐受电压有效值（kV）			工频击穿电压幅值（kV）	额定机电破坏（kN）	例行拉伸负荷（kN）	质量（kg）	符合标准
						干	湿	冲击					
3	XP-70	普通型	255	146	295	70	40	100	110	70	35	5.3	IEC GB
	XP1-70	普通型	255	146	320	70	40	100	110	70	35	5.8	
	XHP-70	钟罩型	255	146	450	80	45	100	120	70	35	6.1	
	XHP5-70	钟罩型	280	146	400	80	45	100	120	70	35	6.0	
	XWP2-70	双伞型	255	146	400	75	40	100	120	70	35	5.8	
	XWP3-70	双伞型	280	160	450	75	45	120	120	70	35	7.6	
	XWP8-70	双伞型	280	146	450	75	42	120	120	70	35	7.5	
	XSP-70	三伞型	320	155	550	85	45	120	120	70	35	10.7	
	XSP1-70	三伞型	320	160	550	85	45	120	120	70	35	10.7	
	XMP-70	草帽型	350	146	340	75	40	105	120	70	35	7.4	
4	XP3-70C	普通型	255	146	295	70	40	100	110	70	35	5.7	IEC ANSI AS BS
	XP6-70C	普通型	255	146	360	70	40	100	110	70	35	6.0	
	XP1-70	普通型	255	127	295	70	40	100	110	70	35	5.6	
	XP3-70	普通型	255	146	295	70	40	100	110	70	35	5.6	
	XP4-70	普通型	270	146	330	70	40	100	110	70	35	5.8	
	XP5-70	普通型	255	146	330	70	40	100	110	70	35	5.8	
	XP6-70	普通型	255	146	360	70	40	100	120	70	35	6.0	
	XHP-70	钟罩型	255	146	432	80	45	115	120	70	35	6.9	
	XHP-70C	钟罩型	255	146	432	80	45	115	120	70	35	6.9	
	XWP1-70	双伞型	255	160	400	75	40	110	120	70	35	5.85	
	XWP2-70	双伞型	255	146	400	75	40	110	120	70	35	5.8	
	XWP3-70	双伞型	280	146	450	75	42	110	120	70	35	7.5	
	XWP4-70	双伞型	280	160	450	75	42	110	120	70	35	7.6	
	XWP8-70	双伞型	330	146	525	85	45	120	120	70	35	9.8	
	XWP9-70	双伞型	330	160	525	85	45	120	120	70	35	9.8	
	XWP7-70	三伞型	280	146	500	85	45	120	130	70	35	8.7	
	XWP6-70	三伞型	280	160	500	85	45	120	130	70	35	8.7	
	XWP11-70	三伞型	310	146	545	85	45	120	130	70	35	10.7	
	XMP-70	草帽型	350	146	330	75	40	110	120	70	35	7.8	
5	LXY2-70	普通型	255	127	320		40	100	130	70		4.0	IEC BS AS ANSI
	LXY1-70	普通型	255	146	320		40	100	130	70		4.0	
	LXY-70D	普通型大盘径	320	146	500		55		130	70		6.2	
	LXHY4-70	钟罩型	255	146	400		45		130	70		5.2	
	LXHY5-70	钟罩型	280	146	450		50		130	70		5.8	
	LXAY-70	空气动力型	390	127	365				130	70		6.0	
	LXAY1-70	空气动力型	390	146	365				130	70		6.0	
	LXWY-70D	双伞型	280	146	450				130	70		6.1	

续表

厂家序号	产品型号	图号	盘径（mm）	高度（mm）	泄漏距离（mm）	耐受电压有效值（kV）			工频击穿电压幅值（kV）	额定机电破坏（kN）	例行拉伸负荷（kN）	质量（kg）	符合标准
						干	湿	冲击					
6	FC70/146	普通型	255	146	320	70	40	100	130	70		3.7	IEC GB BS
	FC7P/146	钟罩型	255	146	400	80	45	110	130	70		4.6	
	FC70P/146	钟罩型	280	146	450	85	50	125	130	70		5.8	
	FC70PL/146	钟罩型	330	146	550	90	55	140	130	70		8.9	
	FC70D/146	空气动力型	380	146	365	55	45	90	130	70		5.6	
	FC70S/146	双伞型	280	146	450					70			

表 C-2　　100kN 盘形绝缘子

厂家序号	产品型号	图号	盘径（mm）	高度（mm）	泄漏距离（mm）	耐受电压有效值（kV）			工频击穿电压幅值（kV）	额定机电破坏（kN）	例行拉伸负荷（kN）	质量（kg）	符合标准
						干	湿	冲击					
1	XP-100	普通型	255	146	295	70	40	100	110	100	50	5.7	IEC BS AS ANSI
	XP3-100	普通型	280	146	340	70	40	100	110	100	50	6.6	
	XHP2-100	钟罩型	255	146	432	80	42	120	120	100	50	7.7	
	XMP-100	草帽型	350	146	300	70	40	105	120	100	50	6.7	
	XWP1-100	双伞型	255	160	400	80	42	120	120	100	50	7.0	
	XWP2-100	双伞型	280	160	450	80	45	120	120	100	50	8.5	
	XWP3-100	双伞型	280	146	450	80	45	120	120	100	50	7.9	
	XSP1-100	三伞型	300	155	545	80	45	130	120	100	50	9.3	
	XSP4-100	三伞型	320	160	550	80	45	130	120	100	50	9.4	
2	XP-100	普通型	255	146	295	70	40	100	110	100	50	6.3	IEC GB
	XP1-100	普通型	255	146	320	70	40	100	110	100	50	6.8	
	XHP-100	钟罩型	255	146	432	80	45	100	120	100	50	6.9	
	XWP2-100	双伞型	280	160	450	75	45	120	120	100	50	7.6	
	XWP3-100	双伞型	280	146	450	75	45	120	120	100	50	7.5	
	XWP6-100	双伞型	255	146	400	75	40	100	120	100	50	6.2	
	XSP-100	三伞型	320	155	545	85	45	120	120	100	50	10.8	
	XSP1-100	三伞型	320	160	545	85	45	120	120	100	50	10.8	
	XMP-100	草帽型	360	146	340	75	40	105	120	100	50	7.9	
3	XP-100	普通型	255	146	295	70	40	100	110	100	50	5.7	IEC ANSI AS BS
	XP2-100	普通型	255	146	340	70	40	100	120	100	50	5.85	
	XHP-100	钟罩型	255	146	432	80	45	115	120	100	50	6.9	
	XWP1-100	双伞型	255	160	400	75	40	110	120	100	50	5.9	
	XWP2-100	双伞型	280	160	450	75	42	110	120	100	50	7.6	
	XWP5-100	双伞型	280	155	450	75	42	110	120	100	50	7.6	
	XWP3-100	双伞型	255	146	400	75	40	110	120	100	50	5.8	

续表

厂家序号	产品型号	图号	盘径（mm）	高度（mm）	泄漏距离（mm）	耐受电压有效值（kV）			工频击穿电压幅值（kV）	额定机电破坏（kN）	例行拉伸负荷（kN）	质量（kg）	符合标准
						干	湿	冲击					
3	XWP4-100	双伞型	280	146	450	75	42	110	120	100	50	7.5	IEC ANSI AS BS
	XWP8-100	双伞型	330	146	525	85	45	120	120	100	50	9.9	
	XWP9-100	双伞型	330	160	525	85	45	120	120	100	50	9.9	
	XWP7-100	三伞型	280	146	500	85	45	120	130	100	50	8.8	
	XWP6-100	三伞型	280	160	500	85	45	120	130	100	50	8.8	
	XWP11-100	三伞型	310	146	545	85	45	120	130	100	50	10.8	
	XWP12-100	三伞型	310	155	545	85	45	120	130	100	50	10.9	
	XWP10-100	三伞型	310	160	545	85	45	120	130	100	50	10.9	
	XMP-100	草帽型	360	146	330	75	40	110	120	100	50	7.9	
4	LXY-100	普通型	255	146	320		40	100	130	100		4.1	IEC BS AS ANSI
	LXHY-100	钟罩型	255	146	400		45		130	100		5.2	
	LXHY4-100	钟罩型	280	146	450		50		130	100		5.9	
	LXHY5-100	钟罩型	320	146	550		55		130	100		8.2	
	LXY-100D	普通型大盘径	320	146	500		50	110	130	100		6.3	
	LXAY-100	空气动力型	390	146	365				130	100		6.2	
	LXWY-100D	双伞型	280	146	450				130	100		6.2	
5	FC100/127	普通型	255	127	320	70	40	100	130	100		3.7	IEC GB BS
	FC100/146	普通型	255	146	320	70	40	100	130	100		4.0	
	FC10P/146	钟罩型	255	146	400	80	45	110	130	100		4.6	
	FC100P/146	钟罩型	280	146	450	85	50	125	130	100		5.8	
	FC100PL/146	钟罩型	330	146	550	90	55	140	130	100		8.9	
	FC100D/146	空气动力型	380	146	365	55	45	90	130	100		5.6	
	FC100S/146	双伞型	280	146	450					100			

表 C-3　　120kN 盘形绝缘子

厂家序号	产品型号	图号	盘径（mm）	高度（mm）	泄漏距离（mm）	耐压电压有效值（kV）			工频击穿电压幅值（kV）	额定机电破坏（kN）	例行拉伸负荷（kN）	质量（kg）	符合标准
						干	湿	冲击					
1	U120B/146	普通型	254	146	320	70	40	110	110	120	60	5.5	IEC GB
	U120BP/146D	双伞型	280	146	450	75	40	110	120	120	60	7.5	
	U120BP/160D	双伞型	280	160	450	75	40	110	120	120	60	7.5	
	U120BP/155T	三伞型	320	155	550	85	45	120	120	120	60	11.0	

续表

厂家序号	产品型号	图号	盘径（mm）	高度（mm）	泄漏距离（mm）	耐压电压有效值（kV）			工频击穿电压幅值（kV）	额定机电破坏（kN）	例行拉伸负荷（kN）	质量（kg）	符合标准
						干	湿	冲击					
2	XP-120	普通型	255	146	295	70	40	100	110	120	60	5.7	IEC BS AS ANSI
	XHP2-120	钟罩型	255	146	432	80	42	120	120	120	60	8.2	
	XMP-120	草帽型	350	146	300	70	40	105	120	120	60	7.0	
	XWP2-120	双伞型	280	160	450	80	45	120	120	120	60	8.5	
	XWP3-120	双伞型	280	146	450	80	45	120	120	120	60	8.3	
3	XP-120C	普通型	255	146	320	70	40	100	110	120	60	6.3	IEC GB
	XP-120	普通型	255	146	295	70	40	100	110	120	60	6.3	
	XP1-120	普通型	255	146	320	70	40	100	110	120	60	6.8	
	XHP-120	钟罩型	255	146	432	80	45	100	120	120	60	6.9	
	XHP4-120	钟罩型	280	146	400	80	45	100	120	120	60	6.5	
	XWP2-120	双伞型	280	160	450	85	45	120	120	120	60	7.6	
	XWP3-120	双伞型	280	146	450	85	45	120	120	120	60	7.5	
	XWP6-120	双伞型	255	146	400	75	40	100	120	120	60	6.2	
	XSP-120	三伞型	320	155	545	85	45	120	120	120	60	11.0	
	XSP1-120	三伞型	320	160	545	85	45	120	120	120	60	11.0	
	XMP-120	草帽型	360	146	340	75	40	105	120	120	60	7.9	
4	XP-120C	普通型	255	146	295	70	40	100	110	120	60	6.3	IEC ANSI AS BS
	XP-120	普通型	255	146	295	70	40	100	110	120	60	6.25	
	XP1-120	普通型	255	146	330	70	40	100	120	120	60	6.9	
	XHP-120	钟罩型	255	146	432	80	45	115	120	120	60	7.8	
	XWP5-120	双伞型	280	146	400	85	45	120	120	120	60	7.3	
	XWP1-120	双伞型	300	155/160	450	85	45	120	120	120	60	8.8	
	XWP4（2）-120	双伞型	280	155/160	450	85	45	120	120	120	60	8.7	
	XWP3-120	双伞型	280	146	450	85	45	120	120	120	60	8.7	
	XMP-120	草帽型	360	160	330	75	40	110	120	120	60	8.5	
5	LXY-120	普通型	255	146	320		40	100	130	120		4.2	IEC BS AS ANSI
	LXHY-120	钟罩型	255	146	400		45		130	120		5.3	
	LXHY4-120	钟罩型	280	146	450		50		130	120		6.0	
	LXHY5-120	钟罩型	320	146	550		55		130	120		8.3	
	LXY-120D	普通型大盘径	320	146	500		50	110	130	120		6.4	
	LXAY-120	空气动力型	390	146	365				130	120		6.2	
	LXWY-120D	双伞型	280	146	450				130	120		6.3	

续表

厂家序号	产品型号	图号	盘径（mm）	高度（mm）	泄漏距离（mm）	耐压电压有效值（kV）			工频击穿电压幅值（kV）	额定机电破坏（kN）	例行拉伸负荷（kN）	质量（kg）	符合标准
						干	湿	冲击					
6	FC120/127	普通型	255	127	320	70	40	100	130	120		4.0	IEC GB BS
	FC120/146	普通型	255	146	320	70	40	100	130	120		4.0	
	FC12P/146	钟罩型	255	146	400	80	45	110	130	120		4.6	
	FC120P/146	钟罩型	280	146	450	80	50	125	130	120		5.8	
	FC120PL/146	钟罩型	330	146	550	90	55	140	130	120		8.9	
	FC120SPE/146	钟罩型	330	146	620	90	55	140	130	120		8.9	
	FC120D/146	空气动力型	380	146	365	55	45	90	130	120		5.6	
	FC120S/146（U120BP/146D）	双伞型	280	146	450					120			

表 C-4　160kN 盘形绝缘子

厂家序号	产品型号	图号	盘径（mm）	高度（mm）	泄漏距离（mm）	耐受电压有效值（kV）			工频击穿电压幅值（kV）	额定机电破坏（kN）	例行拉伸负荷（kN）	质量（kg）	符合标准
						干	湿	冲击					
1	U160B/146（CA-531 系列）	普通型	254	146	325	70	40	110	110	160	80	6.0	IEC GB
	U160B/155（CA-531 系列）	普通型	254	155	325	70	40	110	110	160	80	6.0	
	U160B/146（CA-580 系列）	普通型	280	146	405	75	45	115	110	160	80	7.5	
	U160B/155（CA-580 系列）	普通型	280	155	405	75	45	115	110	160	80	7.5	
	U160B/170（CA-580 系列）	普通型	280	170	405	75	45	115	110	160	80	7.5	
	U160BP/155D	双伞型	290	155	450	85	45	120	120	160	80	8.5	
	U160BP/160D	双伞型	290	160	450	85	45	120	120	160	80	8.5	
	U160BP/170D（CA-882 系列）	双伞型	290	170	450	85	45	120	120	160	80	8.5	
	U160BP/170D（CA-885 系列）	双伞型	355	170	555	85	45	130	120	160	80	12.0	
	U160BP/155T	三伞型	325	155	545	85	45	120	120	160	80	11.0	
	U160BP/160T	三伞型	325	160	545	85	45	120	120	160	80	11.0	
	U160BP/170T	三伞型	325	170	545	85	45	120	120	160	80	11.0	
2	XP3-160	普通型	280	155	350	75	42	105	110	160	80	8.7	IEC BS AS ANSI
	XP10-160	普通型	280	170	405	75	45	110	110	160	80	9.1	
	XP12-160	普通型	255	146	320	70	40	100	110	160	80	7.8	
	XHP2-160	钟罩型	330	170	525	90	55	135	130	160	80	11.7	
	XMP2-160	草帽型	425	146	385	75	45	110	130	160	80	11.4	
	XWP-160	双伞型	300	155	400	80	45	130	120	160	80	9.2	
	XWP2-160	双伞型	300	155	450	80	45	130	120	160	80	9.1	

续表

厂家序号	产品型号	图号	盘径（mm）	高度（mm）	泄漏距离（mm）	耐受电压有效值（kV）			工频击穿电压幅值（kV）	额定机电破坏（kN）	例行拉伸负荷（kN）	质量（kg）	符合标准
						干	湿	冲击					
2	XWP3-160	双伞型	280	155	450	80	45	130	120	160	80	8.6	IEC BS AS ANSI
	XWP6-160	双伞型	330	170	450	80	45	130	120	160	80	11.0	
	XWP7-160	双伞型	340	170	525	90	50	135	130	160	80	10.9	
	XWP9-160	双伞型	300	170	450	80	45	130	120	160	80	9.1	
	XSP-160	三伞型	330	170	545	90	50	130	130	160	80	11.8	
	XSP2-160	三伞型	330	155	545	90	50	130	130	160	80	12.0	
3	XP-160	普通型	300	155	405	75	45	110	130	160	80	8.2	IEC GB
	XP1-160	普通型	280	155	380	75	45	105	130	160	80	8.8	
	XP2-160	普通型	255	155	305	70	40	105	130	160	80	6.9	
	XHP-160	钟罩型	330	155	550	80	50	110	130	160	80	12.5	
	XWP2-160	双伞型	300	155	450	85	45	120	130	160	80	9.5	
	XWP7-160	双伞型	340	170	525	85	45	125	130	160	80	11.3	
	XSP-160	三伞型	325	155	545	85	50	130	130	160	80	12.7	
	XSP1-160	三伞型	325	160	545	85	50	130	130	160	80	12.7	
	XSP2-160	三伞型	325	170	545	85	50	130	130	160	80	12.7	
	XMP-160	草帽型	425	155	385	75	40	115	120	160	80	10.7	
4	LXY-160	普通型	280	170	400		45	110	130	160		6.7	IEC BS AS ANSI
	LXY3-160	普通型	280	155	400		45	110	130	160		6.6	
	LXY4-160	普通型	280	146	400		45	110	130	160		6.6	
	LXHY3-160	钟罩型	280	155	450		50		130	160		7.0	
	LXHY4-160	钟罩型	280	170	450		50		130	160		7.1	
	LXHY5-160	钟罩型	320	170	550		55		130	160		9.1	
	LXHY6-160	钟罩型	320	155	550		55		130	160		9.0	
	LXY-160D	普通型大盘径	320	155	500		50	110	130	160		7.5	
	LXY1-160D	普通型大盘径	320	170	500		50	110	130	160		7.6	
	LXAY-160	空气动力型	420	146	390				130	160		7.9	
	LXAY1-160	空气动力型	420	155	390				130	160		7.9	
	LXWY-160D	双伞型	300	155	450				130	160		7.6	
	LXWY1-160D	双伞型	300	170	450				130	160		7.7	
	LXWY-160T	三伞型	330	170	550				130	160		10.2	
5	XP1-160	普通型	255	146	325	70	40	100	110	160	80	7.3	IEC ANSI AS BS
	XP2-160	普通型	280	146	325	75	45	105	110	160	80	8.2	
	XP3-160	普通型	280	155	360	75	45	105	110	160	80	8.4	
	XP5-160	普通型	280	155	380	75	45	105	120	160	80	8.8	
	XP4-160	普通型	280	170	405	75	45	105	110	160	80	9.2	

续表

厂家序号	产品型号	图号	盘径（mm）	高度（mm）	泄漏距离（mm）	耐受电压有效值（kV）			工频击穿电压幅值（kV）	额定机电破坏（kN）	例行拉伸负荷（kN）	质量（kg）	符合标准
						干	湿	冲击					
5	XHP-160	钟罩型	330	155	550	80	50	125	130	160	80	12.7	IEC ANSI AS BS
	XWP-160	双伞型	280	155	400	75	40	120	120	160	80	8.95	
	XWP1-160	双伞型	300	155	400	85	45	120	120	160	80	8.6	
	XWP2-160	双伞型	300	155/160	450	85	45	120	120	160	80	9.8	
	XWP6-160	双伞型	300	170	450	85	45	120	120	160	80	9.9	
	XWP7-160	大爬距双伞型	340	170	525	85	45	120	120	160	80	11.3	
	XWP9-160	大爬距双伞型	330	155	500	85	45	120	120	160	80	10.9	
	XWP10-160	大爬距双伞型	330	170	500	85	45	120	120	160	80	10.9	
	XWP4-160	三伞型	330	155	545	85	45	120	130	160	80	13.3	
	XWP5-160	三伞型	330	160	545	85	45	120	130	160	80	13.3	
	XWP3-160	三伞型	330	170	545	85	45	120	130	160	80	13.4	
	XMP-160	草帽型	360	155	300	75	40	110	120	160	80	9.9	
	XMP2-160	草帽型	425	146	385	75	40	110	120	160	80	10.5	
6	FC160/155	普通型	280	155	400	75	45	110	130	160		6.5	IEC GB BS
	FC16P/155	钟罩型	280	155	450	85	50	125	130	160		7.2	
	FC160P/155	钟罩型	330	155	550	90	55	140	130	160		9.7	
	FC160SPE/155	钟罩型	330	155	620	90	55	140	130	160		8.8	
	FC160S/155 U160BP/155D	双伞型	300	155	450					160			
	FC160PH/155 U160BP/155T	三伞型	360	155	550					160			
	FC16P/170	钟罩型	280	170	450	85	50	125	130	160		7.2	
	FC160P/170	钟罩型	330	170	550	90	55	140	130	160		9.7	
	FC160D/146	空气动力型	420	146	380	60	50	90	130	160		8.0	
	FC160D/155	空气动力型	420	155	380	60	50	90	130	160		8.0	

表 C-5　　210kN 盘形绝缘子

厂家序号	产品型号	图号	盘径（mm）	高度（mm）	泄漏距离（mm）	耐受电压有效值（kV）			工频击穿电压幅值（kV）	额定机电破坏（kN）	例行拉伸负荷（kN）	质量（kg）	符合标准
						干	湿	冲击					
1	U210B/170	普通型	280	170	405	75	45	115	125	210	105	8.5	IEC GB
	U210BP/170D-2	双伞型	355	170	555	85	45	130	120	210	105	12.0	
	U210BP/170D	双伞型	300	170	450	85	45	120	120	210	105	9.5	
	U210BP/170T	三伞型	325	170	545	85	45	120	120	210	105	11.5	
2	XP2-210	普通型	280	170	380	75	42	105	120	210	105	10.7	IEC BS AS ANSI
	XP3-210	普通型	300	170	400	75	45	110	120	210	105	11.8	
	XHP1-210	钟罩型	330	170	550	90	55	135	130	210	105	14.5	
	XWP1-210	双伞型	300	170	450	80	45	130	130	210	105	12.0	
	XWP3-210	双伞型	350	170	525	90	50	135	130	210	105	13.3	
	XSP-210	三伞型	340	170	545	90	50	130	130	210	105	14.0	

续表

厂家序号	产品型号	图号	盘径（mm）	高度（mm）	泄漏距离（mm）	耐受电压有效值（kV）			工频击穿电压幅值（kV）	额定机电破坏（kN）	例行拉伸负荷（kN）	质量（kg）	符合标准
						干	湿	冲击					
3	XP-210	普通型	280	170	335/380	75	45	115	130	210	105	9.6/10	IEC GB
	XP1-210	普通型	300	170	370/400	75	45	120	130	210	105	11.0	
	XHP-210	钟罩型	300	170	470	80	50	120	130	210	105	12.5	
	XHP1-210	钟罩型	330	170	550	80	50	125	130	210	105	14.0	
	XWP2-210	双伞型	300	170	450	85	45	120	130	210	105	10.9	
	XWP3-210	双伞型	350	170	525	85	50	135	130	210	105	13.2	
	XSP-210	三伞型	340	170	545	85	50	130	130	210	105	14.9	
	XMP-210	草帽型	400	170	380	75	40	125	120	210	105	11.0	
4	LXY3-210	普通型	280	170	400		45	110	130	210		6.7	IEC BS AS ANSI
	LXY4-210	普通型	280	170	450		50	125	130	210		8.0	
	LXHY3-210	钟罩型	320	170	550		55		130	210		9.6	
	LXY-210D	普通型大盘径	320	170	485		50	110	130	210		9.2	
	LXAY-210	空气动力型	420	170	390				130	210		8.6	
	LXWY-210T	三伞型	330	170	550				130	210		10.4	
5	XP1-210	普通型	280	170	335	75	45	105	120	210	105	9.4	IEC ANSI AS BS
	XP-210	普通型	280	170	335	75	45	105	120	210	105	9.6	
	XP4-210	普通型	280	170	380	75	45	105	120	210	105	10.0（10.2）	
	XP2-210	普通型	280	170	405	75	45	105	120	210	105	10.6（10.8）	
	XHP-210	钟罩型	300	170	480	80	50	120	120	210	105	13.1（13.25）	
	XHP1-210	钟罩型	330	170	550	80	45	120	120	210	105	13.95（14.1）	
	XWP-210	双伞型	300	170	450	85	45	120	120	210	105	10.9	
	XWP1-210	双伞型	300	170	450	85	45	120	120	210	105	11.1	
	XWP3-210	大爬距双伞型	340	170	525	85	45	120	120	210	105	12.6	
	XWP4-210	三伞型	330	170	545	85	45	120	130	210	105	14.8（15.0）	
6	FC210/170	普通型	280	170	400	75	45	110	130	210		7.2	IEC GB BS
	FC21P/170	钟罩型	280	170	450	85	50	125	130	210		7.8	
	FC210P/170	钟罩型	330	170	550	90	55	140	130	210		10.2	
	FC210PH/170	三伞型	360	170	550	85	50	120	130	210		10.0	
	FC210D/170	空气动力型	420	170	380	60	50	90	130	210		8.9	
	FC210S/170 U120BP/170D-1	双伞型	300	170	450					210			
	FC210PH/170 U210BP/170T	三伞型	360	170	550					210			

表 C-6　　　　240kN 盘形绝缘子

厂家序号	产品型号	图号	盘径（mm）	高度（mm）	泄漏距离（mm）	耐受电压有效值（kV）			工频击穿电压幅值（kV）	额定机电破坏（kN）	例行拉伸负荷（kN）	质量（kg）	符合标准
						干	湿	冲击					
1	U240B/170	普通型	280	170	405	75	45	115	125	240	120	9.0	IEC GB
	U240BP/170D	双伞型	300	170	450	85	45	120	120	240	120	10.0	
	U240BP/170T	三伞型	325	170	545	85	45	120	120	240	120	12.0	
2	XP-240	普通型	280	170	405	75	45	110	120	240	120	11.1	IEC BS AS ANSI
	XHP1-240	钟罩型	330	170	550	90	55	135	130	240	120	15.2	
	XWP1-240	双伞型	300	170	450	80	45	130	130	240	120	12.5	
	XWP3-240	双伞型	360	170	525	90	50	135	130	240	120	14.4	
	XSP-240	三伞型	360	170	545	90	50	130	130	240	120	15.0	
3	XP-240	普通型	280	170	405	75	42	110	130	240	120	11.2	IEC GB
	XHP1-240	钟罩型	330	170	550	80	50	125	130	240	120	14.5	
	XWP2-240	双伞型	300	170	450	85	45	120	130	240	120	11.6	
	XWP3-240	双伞型	360	170	525	85	50	130	130	240	120	13.2	
	XSP-240	三伞型	340	170	545	85	45	130	130	240	120	15.1	
4	LXY-240	普通型	280	170	400		45	110	130	240		6.8	IEC BS AS ANSI
	LXY2-240	普通型	280	170	450		50	125	130	240		8.4	
	LXHY3-240	空气动力型	320	170	550				130	240		9.9	
	LXY-240D	普通型大盘径	320	170	485		50	110	130	240		9.6	
	LXAY-240	空气动力型	420	170	390				130	240		8.9	
5	XP-240	普通型	280	170	405	75	45	105	120	240	120	11.2	IEC ANSI AS BS
	XWP1-240	双伞型	300	170	450	85	45	120	120	240	120	11.6	
	XWP-240	大爬距双伞型	340	170	525	85	45	120	120	240	120	13.2	
	XWP4-240	三伞型	330	170	545	85	45	120	130	240	120	15.4	
6	FC240/170	普通型	280	170	400	75	45	110	130	240		7.2	IEC GB BS
	FC24P/170	钟罩型	280	170	450	85	50	125	130	240		8.8	
	FC240P/170	钟罩型	330	170	550	90	55	140	130	240		10.2	
	FC240D/170	空气动力型	420	170	380	60	50	90	130	240		9.0	
	FC240PH/70	三伞型	360	170	550					240			

表 C-7　　　　300kN 盘形绝缘子

厂家序号	产品型号	图号	盘径（mm）	高度（mm）	泄漏距离（mm）	耐受电压有效值（kV）			工频击穿电压幅值（kV）	额定机电破坏（kN）	例行拉伸负荷（kN）	质量（kg）	符合标准
						干	湿	冲击					
1	U300BP/195-1	普通型	320	195	505	85	50	130	140	300	150	12.5	IEC GB
	U300BP/195D（CA-886 系列）	双伞型	360	195	550	85	45	130	140	300	150	14.5	

续表

厂家序号	产品型号	图号	盘径（mm）	高度（mm）	泄漏距离（mm）	耐受电压有效值（kV）			工频击穿电压幅值（kV）	额定机电破坏（kN）	例行拉伸负荷（kN）	质量（kg）	符合标准
						干	湿	冲击					
1	U300BP/195D（CA-887 系列）	双伞型	330	195	485	85	45	130	140	300	150	13.0	IEC GB
	U300BP/195T（CA-876 系列）	三伞型	400	195	635	100	60	150	140	300	150	18.0	
	U300BP/195T（CA-877 系列）	三伞型	355	195	550	85	45	130	140	300	150	14.5	
2	XP1-300	普通型	320	195	390	75	45	110	120	300	150	13.6	IEC BS AS ANSI
	XHP2-300	钟罩型	330	195	505	80	45	130	130	300	150	15.7	
	XHP5-300	钟罩型	360	195	600	90	55	135	130	300	150	19.1	
	XWP-300	双伞型	330	195	505	85	47	130	130	300	150	14.8	
	XSP-300	三伞型	360	195	550	90	50	130	130	300	150	17.1	
3	XP-300	普通型	320	195	485	85	50	130	130	300	150	14.3	IEC GB
	XHP1-300	钟罩型	330	195	505	85	50	130	130	300	150	15.1	
	XWP-300	双伞型	330	195	480	85	45	130	130	300	150	14.8	
	XSP-300	三伞型	360	195	550	85	50	140	130	300	150	16.3	
	XSP1-300	三伞型	400	195	635	100	60	135	130	300	150	20.1	
4	LXY3-300	普通型	320	195	485		50	130	130	300		10.7	IEC BS AS ANSI
	LXHY4-300	钟罩型	320	195	550		55		130	300		11.3	
	LXY-300D	普通型大盘径	390	195	635		50	130	130	300		13.4	
	LXY1-300D	普通型大盘径	390	195	710		50	130	130	300		14.1	
	LXAY-300	空气动力型	450	195	450				130	300		12.1	
	LXWY-300T	三伞型	360	195	635				130	300		11.3	
5	XP-300	普通型	320	195	370	85	50	110	120	300	150	13.1	IEC ANSI AS BS
	XP1-300	普通型	320	195	480	85	50	110	120	300	150	14.25	
	XHP-300	钟罩型	320	195	505	85	50	110	120	300	150	14.75	
	XWP2-300	双伞型	330	195	480	85	45	120	130	300	150	14.8	
	XWP1-300	大爬距双伞型	360	195	525	85	45	120	130	300	150	14.9	
	XWP-300	三伞型	340	195	545	85	45	120	130	300	150	16.3	
	XWP3-300	三伞型	380	195	635	100	60	130	140	300	150	20.5	
6	FC300/195	普通型	320	195	485	85	50	130	130	300		10.9	IEC GB BS
	FC30P/195	钟罩型	360	195	635	90	55	140	130	300		13.6	
	FC30PJ/195	钟罩型	320	195	590	90	50	135	135	300		11.1	
	FC300P/195	钟罩型	380	195	690	100	60	150	130	300		15.3	
	FC300D/195	空气动力型	420	195	360	60	50	90	130	300		10.0	
	FC300PH/194	三伞型	360	195	550					300			

表 C-8　　400、420kN 盘形绝缘子

厂家序号	产品型号	图号	盘径（mm）	高度（mm）	泄漏距离（mm）	耐受电压有效值（kV）			工频击穿电压幅值（kV）	额定机电破坏（kN）	例行拉伸负荷（kN）	质量（kg）	符合标准
						干	湿	冲击					
1	U400B/205	普通型	340	205	550	90	50	130	140	400	200	16.0	IEC GB
	U420B/205	普通型	340	205	550	90	50	130	140	420	210	16.0	
	U400BP/205D-1	双伞型	375	205	555	100	50	140	140	400	200	18.0	
	U420BP/205D-1	双伞型	375	205	555	100	50	140	140	420	210	18.0	
	U400BP/205T	三伞型	400	205	635	100	60	150	140	400	200	20.0	
	U420BP/205T	三伞型	400	205	635	100	60	150	140	420	210	20.0	
2	XP2-400	普通型	340	205	550	90	50	140	130	400	200	19.5	IEC BS AS ANSI
	XP-420	普通型	340	205	550	90	50	140	130	420	210	19.5	
	XWP-420	双伞型	380	205	550	90	50	140	140	420	210	19.5	
	XSP2-420	三伞型	350	205	550	95	50	140	140	420	210	20.4	
	XSP3-420	三伞型	400	205	635	95	50	145	140	420	210	23.2	
3	XP1-420	普通型	340	205	550	90	50	140	130	420	210	21.1	IEC GB
	XWP-420	双伞型	360	205	525	85	45	135	130	420	210	20.0	
	XWP1-420	双伞型	380	205	550	85	50	140	130	420	210	20.5	
	XWP2-420	双伞型	400	205	615	85	45	135	130	420	210	21.0	
	XSP-420	三伞型	350	205	550	85	50	140	140	420	210	22.0	
	XSP1-420	三伞型	400	205	635	100	60	135	140	420	210	26.0	
4	LXY-420	普通型	360	205	550		55	140	140	420		14.6	IEC BS AS ANSI
	LXY-420D	普通型大盘径	380	205	620		55	135	130	420		15.8	
	LXY1-420D	普通型大盘径	390	205	670		55	135	130	420		16.2	
	LXY2-420D	普通型大盘径	390	205	710		55	135	130	420		16.5	
	LXWY-420T	三伞型	380	205	635				130	420		16.3	
5	XP-420	普通型	340	205	550	90	50	130	140	420	210	21.1	IEC ANSI AS BS
	XWP-420	大爬距双伞型	370	205	550	85	45	130	140	420	210	20.5	
	XWP4-420	三伞型	345	205	550	85	45	130	140	420	210	20.9	
6	FC400/205	普通型	360	205	550	90	55	140	130	400		14.0	IEC GB BS
	FC420/205	普通型	360	205	550	90	55	140	130	420		14.0	

表 C-9　　530、550kN 盘形绝缘子

厂家序号	产品型号	图号	盘径（mm）	高度（mm）	泄漏距离（mm）	耐受电压有效值（kV）			工频击穿电压幅值（kV）	额定机电破坏（kN）	例行拉伸负荷（kN）	质量（kg）	符合标准
						干	湿	冲击					
1	U530B/240	普通型	380	240	700	95	55	135	140	530	265	23.5	IEC GB
	U550B/240	普通型	380	240	700	95	55	135	140	550	275	23.5	
	U530BP/240T	三伞型	400	240	650	100	60	150	140	530	265	22.5	
	U550BP/240T	三伞型	400	240	650	100	60	150	140	550	275	22.5	
2	XP-530	普通型	380	240	700	95	55	140	140	530	265	29.0	IEC BS AS ANSI
	XP-550	普通型	380	240	700	95	55	140	140	550	275	29.0	
	XWP-550	双伞型	400	240	550	90	50	145	140	550	275	26.8	
3	XP-550	普通型	380	240	700	95	55	140	140	550	275	29.5	IEC GB
	XWP-550	双伞型	420	240	600	90	50	145	140	550	275	30.5	
	XSP-550	三伞型	400	240	650	100	60	140	140	550	275	31.0	
4	LXY-550	普通型	380	240	620		60	155	140	550		18.6	IEC BS AS ANSI
	LXY-550D	普通型大盘径	390	240	650		55	135	130	550		18.7	
	LXY1-550D	普通型大盘径	390	240	710		55	135	130	550		19.2	
	LXY2-550D	普通型大盘径	390	240	670		55	135	130	550		18.9	
	LXWY-550T	三伞型	380	240	635				130	550		18.5	
5	XP-530	普通型	380	240	700	95	55	135	140	530	265	29.5	IEC ANSI AS BS
	XP-550	普通型	380	240	700	95	55	135	140	550	275	29.5	
6	FC530/240	普通型	360	240	635	95	55	140	130	530		18.0	IEC GB BS
	FC550/240	普通型	360	240	635	95	55	140	130	550		18.0	

表 C-10　　760、830kN 盘形绝缘子

厂家序号	产品型号	图号	盘径（mm）	高度（mm）	泄漏距离（mm）	耐受电压有效值（kV）			工频击穿电压幅值（kV）	额定机电破坏（kN）	例行拉伸负荷（kN）	质量（kg）	符合标准
						干	湿	冲击					
1	U760B/280	普通型	400	280	700	95	55	135	140	760	380	29.5	IEC GB
2	LXY-830	普通型	400	270	720		60	155	140	830		24.0	IEC BS AS ANSI

表 C-11　　直流盘形瓷绝缘子

厂家序号	绝缘子型式	绝缘子代号	绝缘件公称直径（mm）	公称结构高度（mm）	公称爬电距离（mm）	联结标记（mm）	规定机电（械）破坏负荷（kN）	湿工频耐受电压（kV）	雷电冲击耐受电压（kV）
1	钟罩型	XZP-160	330	170	560	20	160	±55	140
		XZP-210	330	170	560	20	210	±55	140
		XZP-240	330	170	560	24	240	±55	140
		XZP-300	390	195	635	24	300	±55	140
		XZP-420	340	205	560	28	420	±55	140
	双伞型	XZWP1-160	360	170	545	20	160	±55	140
		XZWP1-210	360	170	545	20	210	±55	140
		XZWP1-240	360	170	545	24	240	±55	140
		XZWP1-300	360	195	545	24	300	±55	140
		XZWP1-420	400	205	600	28	420	±60	145
	三伞型	XZP2-160	340	170	560	20	160	±55	140
		XZP2-210	340	170	560	20	210	±55	140
		XZP2-240	340	170	560	24	240	±55	140
		XZP2-300	400	195	635	24	300	±60	150
		XZP2-420	400	205	635	28	420	±60	150
2	钟罩型	XZP-120	280	146	450	16	120	50	135
		XZP-160	320	170	545	20	160	55	150
		XZP-210	320	170	545	20/24	210	55	150
		XZP-240	320	170	545	24	240	55	150
		XZP1-300	400	195	635	24	300	60	155
		XZP2-300	340	195	570	24	300	55	150
		XZP1-400	340	205	545	28	400	55	150
		XZP2-400	400	205	635	28	400	60	155
		XZP-530	380	240	635	32	530	60	155
	双伞型	XZWP-160	360	170	545	20	160	55	150
		XZWP-210	360	170	545	20	210	55	150
		XZWP-240	360	170	545	24	240	55	150
		XZWP-300	360	195	545	24	300	55	150
		XZWP-400	400	205	600	28	400	60	155
	三伞型	XZSP-160	340	170	545	20	160	55	150
		XZSP-210	340	170	545	20	210	55	150
		XZSP-240	350	170	550	24	240	55	150
		XZSP-300	400	195	635	24	300	60	155

续表

厂家序号	绝缘子型式	绝缘子代号	绝缘件公称直径（mm）	公称结构高度（mm）	公称爬电距离（mm）	联结标记（mm）	规定机电（械）破坏负荷（kN）	湿工频耐受电压（kV）	雷电冲击耐受电压（kV）
3	钟罩型	CA-735EZ	320	170	560	20	160	±55	140
		CA-745EZ	320	170	560	20	210	±55	140
		CA-756EZ	400	195	635	24	300	±60	150
		CA-765EZ	340	205	560	28	400	±55	140
		CA-785EZ	380	240	635	32	530	±55	140
		CA-785EX	380	240	635	32	550	±55	140
	三伞型	CA-772EZ	340	170	560	20	160	±55	140
		CA-774EZ	340	170	560	20	210	±55	140
		CA-776EZ	400	195	635	24	300	±60	150
		CA-778EY	400	204	635	28	420	±60	150
		CA-779EX	400	240	635	32	550	±60	150

表 C-12　　直流盘型玻璃绝缘子

厂家序号	绝缘子型式	绝缘子代号	绝缘件公称直径（mm）	公称结构高度（mm）	公称爬电距离（mm）	联结标记（mm）	规定机电（械）破坏负荷（kN）	湿工频耐受电压（kV）	雷电冲击耐受电压（kV）
1	钟罩型	U160BP/170HDC	330	170	550	20	160	±65	140
		U210BP/170HDC	330	170	550	20	210	±65	140
		U240BP/170HDC	330	170	550	24	240	±65	140
		U300BP/195HDC	390	195	635	24	300	±65	140
		U300BP2/195HDC	330	195	550	24	300	±60	140
		U300BP3/195HDC	380	195	710	24	300	±75	155
		U400BP/205HDC（U420BP/205HDC）	360	205	550	28	400（420）	±65	140
		U400BP2/205HDC（U420BP2/205HDC）	380	205	620	28	400（420）	±70	150
		U530BP/240HDC（U550BP/240HDC）	360	240	650	32	530（550）	±70	150
		U530BP2/240HDC（U550BP2/240HDC）	380	240	720	32	530（550）	±70	150
		U760BP/280HDC（U800BP/280HDC）	400	280	710	36	760（800）	±75	150
		U840BP/300HDC	400	300	710	40	840	±75	150
	三伞型	U160BP/170TDC	320	170	550	20	160	±55	130
		U210BP/170TDC	320	170	550	20	210	±55	130
		U240BP/170TDC	320	170	550	24	240	±55	130
		U300BP/195TDC	380	195	635	24	300	±60	150
		U400BP/205TDC（U420BP/205TDC）	400	205	650	28	400（420）	±60	150
		U530BP/240TDC（U550BP/240TDC）	400	240	635	32	530（550）	±60	150

续表

厂家序号	绝缘子型式	绝缘子代号	绝缘件公称直径（mm）	公称结构高度（mm）	公称爬电距离（mm）	联结标记（mm）	规定机电（械）破坏负荷（kN）	湿工频耐受电压（kV）	雷电冲击耐受电压（kV）
1	草帽型	U160BP/170MDC	420	170	390	20	160	±60	95
		U210BP/170MDC	420	170	390	20	210	±60	95
		U240BP/170MDC	420	170	390	24	240	±60	95
		U300BP/195MDC	455	195	450	24	300	±60	100
2	钟罩型	FC160P/C170DC	330	170	550	20	160	65	140
		FC210P/C170DC	330	170	560	20	210	65	140
		FC240P/C170DC	330	170	560	20	240	65	140
		FC30P/C195DC	360	195	635	24	300	65	140
		FC300P/C195DC	380	195	690	24	300	65	140
		FC400P/C205DC	360	205	560	28	400	65	140
		FC420P/C205DC	360	205	560	28	420	65	140
		FC530P/C240DC	360	240	635	32	530	75	140
		FC550P/C240DC	360	240	635	32	550	75	140
		FC400F/C205DC	360	205	620	28	400	75	140
		FC420F/C205DC	360	205	620	28	420	75	140
		FC530F/C240DC	380	240	720	32	530	75	150
		FC550F/C240DC	380	240	720	32	550	75	150
	三伞型	FC160P/C155T DC	330	155	550	20	160	65	140
		FC160P/C170T DC	330	170	550	20	160	65	140
		FC210P/C170T DC	330	170	550	20	210	65	140
		FC240P/C170T DC	330	170	550	24	240	65	140
		FC30P/C195T DC	400	195	635	24	300	70	140
		FC400P/C205T DC	400	205	635	28	400	70	140
		FC420P/C205T DC	400	205	635	28	420	70	140
		FC530P/C240T DC	400	240	635	32	530	70	140
		FC550P/C240T DC	400	240	635	32	550	70	140
	空气动力型	FC160D/C155DC	420	146/155/170	380	20	160	60	90
		FC210D/C170DC	420	170	380	20	210	60	90
3	钟罩型	LXZY-160	320	170	560	20	160	55	210
		LXZY-210	320	170	560	20	210	55	210
		LXZY-240	320	170	560	24	240	55	210
		LXZY-300	390	195	635	24	300	60	225
		LXZY-420	360	205	550	28	420	65	225
		LXZY-550	360	240	620	32	550	65	240
		LXZY-830	400	270	720	36	830	75	255

续表

厂家序号	绝缘子型式	绝缘子代号	绝缘件公称直径（mm）	公称结构高度（mm）	公称爬电距离（mm）	联结标记（mm）	规定机电（械）破坏负荷（kN）	湿工频耐受电压（kV）	雷电冲击耐受电压（kV）
3	空气动力型	LXAZY-160	420	170	390	20	160	60	210
		LXAZY-210	420	170	390	20	210	60	210
		LXAZY-300	450	195	450	24	300	60	225
	三伞型	LXAZY-160T	330	170	550	20	160	55	210
		LXAZY-210T	330	170	550	20	210	55	210
		LXAZY-300T	360	195	635	24	300	60	225
		LXAZY-420T	380	205	635	28	420	65	225

C.2 复合绝缘子技术数据

复合绝缘子型式见图 C-7。复合绝缘子技术数据见表 C-13、表 C-14。

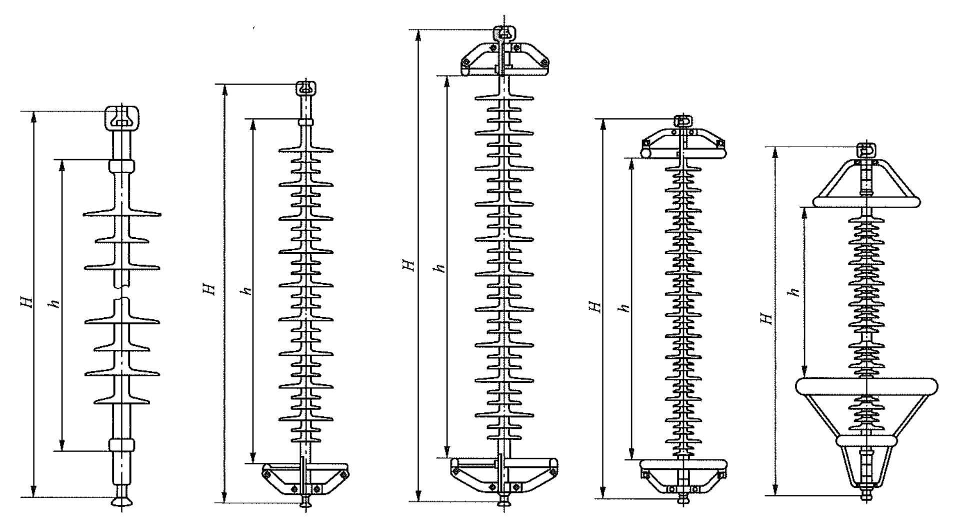


图 C-7 复合绝缘子（其中 H 为结构高度，h 为绝缘距离）

表 C-13 交流复合绝缘子

厂家序号	产品型号	额定电压（kV）	结构高度 H（mm）	绝缘距离 h（mm）	泄漏距离（mm）	额定机械负荷（kN）	耐受电压有效值（kV）：干雷电冲击耐受电压（kV）	耐受电压有效值（kV）：湿操作冲击耐受电压（kV）	耐受电压有效值（kV）：湿工频耐受电压（kV）	质量（kg）	符合标准
1	FXBW4-10/70	10	430±15	230	450	70	100		48	2.0	IEC BS AS ANSI
	FXBW4-10/100	10	430±15	200	450	100	100		48	2.1	
	FXBW2-35/70	35	650±15	450	810	70	230		95	2.4	
	FXBW3-35/70	35	650±15	450	1050	70	230		95	2.6	
	FXBW4-35/70	35	628±15	400	1012	70	230		95	2.6	
	FXBW2-66/70	66	940±15	700	1450	70	410		185	2.8	
	FXBW4-66/70	66	940±15	700	1900	70	410		185	3.5	
	FXBW1-66/100	66	858±15	630	1377	100	410		185	3.0	

续表

厂家序号	产品型号	额定电压（kV）	结构高度 H（mm）	绝缘距离 h（mm）	泄漏距离（mm）	额定机械负荷（kN）	耐受电压有效值（kV）			质量（kg）	符合标准
							干雷电冲击耐受电压（kV）	湿操作冲击耐受电压（kV）	湿工频耐受电压（kV）		
1	FXBW2-66/100	66	950±15	720	1600	100	410		185	3.1	IEC BS AS ANSI
	FXB2-110/70	110	1240±15	1040	2520	70	550		230	4.1	
	FXB4-110/70	110	1240±15	1040	3150	70	550		230	4.8	
	FXBW2-110/100	110	1240±15	1000	2450	100	550		230	4.0	
	FXBW4-110/100	110	1240±15	1000	3150	100	550		230	4.8	
	FXBW4-110/100	110	1568±15	1340	3226	100	550		230	5.0	
	FXBW4-110/160	110	1590±15	1290	3940	160	550		230	8.3	
	FXB2-220/100	220	2240±30	1900	5040	100	1050		460	7.3	
	FXBW4-220/100	220	2240±30	1900	6300	100	1050		460	8.7	
	FXBW2-220/100	220	2350±30	2050	5040	100	1050		460	7.6	
	FXBW4-220/100	220	2540±30	2240	6450	100	1050		460	9.2	
	FXBW4-220/160	220	2350±30	1900	6300	160	1050		460	13.0	
	FXBW4-330/100	330	2990±40	3600	9075	100	1425	950	570	13.5	
	FXBW4-330/160	330	2990±40	2600	9075	160	1425	950	570	18.2	
	FXBW4-330/210	330	2990±40	2660	9075	210	1425	950	570	19.2	
	FXBW4-500/100	500	4785±50	4557	15000	100	2250	1240	740	20.0	
	FXBW4-500/160	500	4450±50	4000	13750	160	2250	1240	740	25.2	
	FXBW4-500/180	500	4450±50	4000	13750	180	2250	1240	740	25.2	
	FXBW4-500/210	500	4450±50	4000	13750	210	2250	1240	740	26.3	
	FXBW4-500/240-1	500	4450±50	4000	13750	240	2250	1240	740	26.3	
	FXBW4-500/240-2	500	4450±50	4000	13750	240	2250	1240	740	27.2	
	FXBW4-500/300	500	4450±50	4000	13750	300	2250	1240	740	33.0	
	FXBW4-500/420	500	4450±50	5000	13750	420	2250	1240	740	41.3	
	FXBW4-750/100	750	8015±50	7200	25000	100	2700	1800	1125	62.2	
	FXBW4-750/160	750	8125±50	7200	25000	160	2700	1800	1125	48.0	
	FXBW4-750/180	750	8125±50	7200	25000	180	2700	1800	1125	48.0	
	FXBW4-750/210	750	8125±50	7200	25000	210	2700	1800	1125	48.0	
	FXBW4-750/240	750	8125±50	7200	25000	240	2700	1800	1125	48.0	
	FXBW4-750/300	750	8189±50	7200	25000	300	2700	1800	1125	66.0	
	FXBW4-750/400	750	8240±50	7200	25000	400	2700	1800	1125	67.0	
	FXBW4-750/420	750	8240±50	7200	25000	420	2700	1800	1125	67.0	
	FXBW4-750/530	750	8329±50	7200	25000	530	2700	1800	1125	69.0	
	FXBW4-750/550	750	8329±50	8500	30000	550	3600	2200	1800	69.0	
	FXBW4-1000/160	1000	8750±50	8500	30000	160	3600	2200	1800	60.0	

续表

厂家序号	产品型号	额定电压（kV）	结构高度 H（mm）	绝缘距离 h（mm）	泄漏距离（mm）	额定机械负荷（kN）	耐受电压有效值（kV）			质量（kg）	符合标准
							干雷电冲击耐受电压（kV）	湿操作冲击耐受电压（kV）	湿工频耐受电压（kV）		
1	FXBW4-1000/180	1000	10050±50	8500	30000	180	3600	2200	1800	60.0	IEC BS AS ANSI
	FXBW4-1000/160	1000	10050±50	8500	30000	160	3600	2200	1800	65.0	
	FXBW4-1000/180	1000	9750±50	8500	30000	180	3600	2200	1800	65.0	
	FXBW4-1000/210	1000	9750±50	8500	30000	210	3600	2200	1800	60.0	
	FXBW4-1000/240	1000	10050±50	8500	30000	240	3600	2200	1800	60.0	
	FXBW4-1000/210	1000	10050±50	8500	30000	210	3600	2200	1800	65.0	
	FXBW4-1000/240	1000	10050±50	8500	30000	240	3600	2200	1800	65.0	
	FXBW4-1000/300	1000	9750±50	8500	30000	300	3600	2200	1800	74.5	
	FXBW4-1000/300	1000	10184±50	8500	30000	300	3600	2200	1800	83.0	
	FXBW4-1000/400	1000	9750±50	8500	30000	400	3600	2200	1800	83.0	
	FXBW4-1000/420	1000	9750±50	8500	30000	420	3600	2200	1800	83.0	
	FXBW4-1000/400	1000	10280±50	8500	30000	400	3600	2200	1800	94.0	
	FXBW4-1000/420	1000	10280±50	8500	30000	420	3600	2200	1800	94.0	
	FXBW4-1000/530	1000	9750±50	8500	30000	530	3600	2200	1800	98.0	
	FXBW4-1000/550	1000	9750±50	8500	30000	550	3600	2200	1800	98.0	
	FXBW4-1000/530	1000	10458±50	8500	30000	530	3600	2200	1800	113.0	
	FXBW4-1000/550	1000	10458±50	8500	30000	550	3600	2200	1800	113.0	
2	FXB1-110/70	110	1180±15	1000	2520	70	550		230	5.5	GB IEC
	FXB2-110/70	110	1240±15	1000	2520	70	550		230	5.5	
	FXB3-110/70	110	1180±15	1000	3150	70	550		230	5.5	
	FXB4-110/70	110	1240±15	1000	3150	70	550		230	5.5	
	FXB1-110/100	110	1180±15	1000	2520	100	550		230	5.5	
	FXB2-110/100	110	1240±15	1000	2520	100	550		230	5.5	
	FXB3-110/100	110	1180±15	1000	3150	100	550		230	5.5	
	FXB4-110/100	110	1240±15	1000	3150	100	550		230	5.5	
	FXB1-220/100	220	2150±30	1900	5040	100	1000		395	9.0	
	FXB2-220/100	220	2240±30	1900	5040	100	1000		395	9.0	
	FXB3-220/100	220	2150±30	1900	6300	100	1000		395	9.0	
	FXB4-220/100	220	2240±30	1900	6300	100	1000		395	9.0	
	FXB1-220/160	220	2150±30	1900	5040	160	1000		395	10.0	
	FXB2-220/160	220	2240±30	1900	5040	160	1000		395	10.0	
	FXB3-220/160	220	2150±30	1900	6300	160	1000		395	10.0	
	FXB4-220/160	220	2240±30	1900	6300	160	1000		395	10.0	
	FXB1-330/100	330	2930±40	2600	7260	100	1425	950	570	12.5	

续表

厂家序号	产品型号	额定电压（kV）	结构高度 H（mm）	绝缘距离 h（mm）	泄漏距离（mm）	额定机械负荷（kN）	耐受电压有效值（kV）			质量（kg）	符合标准
							干雷电冲击耐受电压（kV）	湿操作冲击耐受电压（kV）	湿工频耐受电压（kV）		
2	FXB2-330/100	330	2990±40	2600	7260	100	1425	950	570	12.5	GB IEC
	FXB3-330/100	330	2930±40	2600	9075	100	1425	950	570	12.5	
	FXB4-330/100	330	2990±40	2600	9075	100	1425	950	570	12.5	
	FXB1-330/160	330	2930±40	2600	7260	160	1425	950	570	13.5	
	FXB2-330/160	330	2990±40	2600	7260	160	1425	950	570	13.5	
	FXB3-330/160	330	2930±40	2600	9075	160	1425	950	570	13.5	
	FXB4-330/160	330	2990±40	2600	9075	160	1425	950	570	13.5	
	FXB1-330/210	330	2930±40	2600	7260	210	1425	950	570	13.5	
	FXB2-330/210	330	2990±40	2600	7260	210	1425	950	570	13.5	
	FXB3-330/210	330	2930±40	2600	9075	210	1425	950	570	13.5	
	FXB4-330/210	330	2990±40	2600	9075	210	1425	950	570	13.5	
	FXB4-500/100	500	4450±50	4000	13750	100	2250	1240	740	16.0	
	FXB4-500/120	500	4450±50	4000	13750	120	2250	1240	740	16.0	
	FXB4-500/160	500	4450±50	4000	13750	160	2250	1240	740	16.4	
	FXB4-500/180	500	4450±50	4000	13750	180	2250	1240	740	16.4	
	FXB4-500/210	500	4450±50	4000	13750	210	2250	1240	740	16.4	
	FXB4-500/240	500	4450±50	4000	13750	240	2250	1240	740	16.4	
	FXB4-500/300	500	4450±50	4000	13750	300	2250	1240	740	21.3	
	FXB4-500/400	500	4450±50	4000	13750	400	2250	1240	740	28.2	
	FXB4-500/430	500	4450±50	4000	13750	430	2250	1240	740	28.2	
3	FXBW4-10/70	10	430±15	230	450	70			48	1.8	GB IEC
	FXBW4-10/70	10	340±15	160	400	70			48	1.7	
	FXBW4-10/100	10	430±15	230	450	100			48	1.8	
	FXBW4-35/70	35	660±15	460	880	70	230		95	2.2	
	FXBW4-35/70	35	660±15	460	1015	70	230		95	2.3	
	FXBW4-35/100	35	660±15	460	880	100	230		95	2.2	
	FXBW4-35/100	35	660±15	460	1015	100	230		95	2.3	
	FXBW4-35/120	35	660±15	450	1015	120	230		95	3.1	
	FXBW4-66/70	66	940±15	740	1900	70	410		185	3.2	
	FXBW4-66/70	66	910±15	710	1850	70	410		185	3.1	
	FXBW4-66/100	66	940±15	740	1900	100	410		185	3.2	
	FXBW4-66/100	66	910±15	710	1850	100	410		185	3.1	
	FXBW4-66/100	66	1010±15	810	2200	100	410		185	3.7	
	FXBW4-110/70	110	1240±15	1000	2520	70	550		230	4.2	

续表

厂家序号	产品型号	额定电压（kV）	结构高度 H（mm）	绝缘距离 h（mm）	泄漏距离（mm）	额定机械负荷（kN）	耐受电压有效值（kV）			质量（kg）	符合标准
							干雷电冲击耐受电压（kV）	湿操作冲击耐受电压（kV）	湿工频耐受电压（kV）		
3	FXBW4-110/70	110	1240±15	1000	3150	70	550		230	5.4	GB IEC
	FXBW4-110/70	110	1440±15	1200	3150	70	550		230	4.8	
	FXBW4-110/100	110	1240±15	1000	2520	100	550		230	4.2	
	FXBW4-110/100	110	1240±15	1000	3150	100	550		230	5.4	
	FXBW4-110/100	110	1440±15	1200	3150	100	550		230	4.8	
	FXBW4-110/100	110	1360±15	1120	2800	100	550		230	4.5	
	FXBW4-110/100	110	1290±15	1050	2750	100	550		230	4.2	
	FXBW4-110/120	110	1440±15	1150	3150	120	550		230	6.5	
	FXBW4-110/160	110	1440±15	1100	3150	160	550		230	7.8	
	FXBW2-220/100	220	2160±30	1900	5600	100	1000		395	9.3	
	FXBW2-220/100	220	2160±30	1900	6300	100	1000		395	9.5	
	FXBW2-220/100	220	2240±30	1980	6340	100	1000		395	10.0	
	FXBW2-220/100	220	2350±30	2050	6340	100	1000		395	10.0	
	FXBW2-220/100	220	2190±30	1900	6300	100	1000		395	10.3	
	FXBW2-220/120	220	2240±30	1940	6300	120	1000		395	12.5	
	FXBW2-220/120	220	2350±30	2050	6300	120	1000		395	12.6	
	FXBW2-220/160	220	2240±30	1900	6300	160	1000		395	13.5	
	FXBW2-220/160	220	2350±30	2000	6300	160	1000		395	13.6	
	FXBW2-220/180	220	2350±30	2000	6300	180	1000		395	13.8	
	FXBW2-220/210	220	2240±30	1900	6300	210	1000		395	13.6	
	FXBW2-220/210	220	2350±30	1990	6300	210	1000		395	13.8	
	FXBW2-220/240	220	2350±30	1950	6300	240	1000		395	13.8	
	FXBW2-220/300	220	2350±30	1900	6300	300	1000		395	14.5	
	FXBW2-330/100	330	3050±40	2700	8500	100	1425	950	570	15.6	
	FXBW2-330/100	330	2930±40	2600	7260	100	1425	950	570	13.8	
	FXBW2-330/100	330	2930±40	2600	9075	100	1425	950	570	16.2	
	FXBW2-330/100	330	2990±40	2650	7260	100	1425	950	570	13.8	
	FXBW2-330/100	330	2990±40	2650	9075	100	1425	950	570	16.3	
	FXBW2-330/100	330	3490±40	3150	9075	100	1425	950	570	18.5	
	FXBW2-330/100	330	3490±40	3150	9900	100	1425	950	570	19.6	
	FXBW2-330/160	330	3660±40	3270	9900	160	1425	950	570	21.0	
	FXBW2-330/160	330	3690±40	3290	9600	160	1425	950	570	20.5	
	FXBW2-330/160	330	3200±40	2810	9240	160	1425	950	570	20.0	
	FXBW2-330/210	330	3050±40	2650	8500	210	1425	950	570	19.8	

续表

厂家序号	产品型号	额定电压（kV）	结构高度 H（mm）	绝缘距离 h（mm）	泄漏距离（mm）	额定机械负荷（kN）	耐受电压有效值（kV）			质量（kg）	符合标准
							干雷电冲击耐受电压（kV）	湿操作冲击耐受电压（kV）	湿工频耐受电压（kV）		
3	FXBW2-330/210	330	3660±40	3250	9900	210	1425	950	570	21.5	GB IEC
	FXBW2-330/210	330	3690±40	3270	9600	210	1425	950	570	21.0	
	FXBW2-330/210	330	3200±40	2790	9240	210	1425	950	570	20.5	
	FXBW2-330/300	330	3200±40	2700	9240	300	1425	950	570	26.5	
	FXBW4-500/100	500	4050±50	3700	11000	100	2050	1240	780	22.6	
	FXBW4-500/100	500	4450±50	4110	13750	100	2350	1240	780	27.0	
	FXBW4-500/100	500	4360±50	4020	12000	100	2250	1240	780	23.7	
	FXBW4-500/120	500	4050±50	3700	11000	120	2050	1240	780	22.6	
	FXBW4-500/120	500	4360±50	4020	12000	120	2250	1240	780	24.5	
	FXBW4-500/120	500	4450±50	4110	13750	120	2350	1240	780	27.0	
	FXBW4-500/160	500	4050±50	3660	11000	160	2050	1240	780	24.0	
	FXBW4-500/160	500	4360±50	3970	12000	160	2250	1240	780	25.4	
	FXBW4-500/160	500	4450±50	4060	13750	160	2350	1240	780	28.0	
	FXBW4-500/180	500	4050±50	3650	11000	180	2050	1240	780	24.0	
	FXBW4-500/180	500	4360±50	3960	12000	180	2250	1240	780	25.4	
	FXBW4-500/180	500	4450±50	4050	13750	180	2350	1240	780	28.0	
	FXBW4-500/210	500	4050±50	3650	11000	210	2050	1240	780	23.7	
	FXBW4-500/210	500	4360±50	3960	12000	210	2250	1240	780	25.2	
	FXBW4-500/210	500	4450±50	4050	13750	210	2350	1240	780	28.0	
	FXBW4-500/240	500	4450±50	4050	13750	240	2350	1240	780	28.0	
	FXBW4-500/240	500	4360±50	3960	12000	240	2250	1240	780	25.2	
	FXBW4-500/300	500	4450±50	3960	13750	300	2250	1240	780	34.0	
	FXBW4-500/300	500	4450±50	3960	16000	300	2250	1240	780	41.0	
	FXBW4-500/400	500	4580±50	4050	13750	400	2350	1240	780	37.0	
	FXBW4-500/400	500	5600±50	5110	16000	400	2550	1240	780	48.0	
	FXBW4-500/530	500	4670±50	4050	13750	530	2350	1240	780	52.0	
	FXBW4-750/100	750	6550±50	6050	21600	100	2700	1800	1125	50.0	
	FXBW4-750/100	750	7150±50	6650	23500	100	2700	1800	1125	54.0	
	FXBW4-750/100	750	7250±50	6750	24000	100	2700	1800	1125	55.0	
	FXBW4-750/160	750	7150±50	6700	23500	160	2700	1800	1125	58.0	
	FXBW4-750/180	750	7150±50	6700	23500	180	2700	1800	1125	58.0	
	FXBW4-750/210	750	6550±50	6000	21600	210	2700	1800	1125	55.0	
	FXBW4-750/210	750	6650±50	6100	23500	210	2700	1800	1125	57.0	
	FXBW4-750/210	750	7150±50	6700	23500	210	2700	1800	1125	58.0	

续表

厂家序号	产品型号	额定电压（kV）	结构高度 H（mm）	绝缘距离 h（mm）	泄漏距离（mm）	额定机械负荷（kN）	耐受电压有效值（kV）			质量（kg）	符合标准
							干雷电冲击耐受电压（kV）	湿操作冲击耐受电压（kV）	湿工频耐受电压（kV）		
3	FXBW4-750/210	750	7300±50	6800	24000	210	2700	1800	1125	60.0	GB IEC
	FXBW4-750/300	750	6550±50	6000	21600	300	2700	1800	1125	56.0	
	FXBW4-750/300	750	6750±50	6200	23500	300	2700	1800	1125	58.0	
	FXBW4-750/300	750	7150±50	6600	23500	300	2700	1800	1125	59.0	
	FXBW4-750/300	750	7300±50	6780	24000	300	2700	1800	1125	62.0	
	FXBW4-750/400	750	6550±50	5880	21600	400	2700	1800	1125	62.0	
	FXBW4-750/400	750	6820±50	6150	23500	400	2700	1800	1125	67.0	
	FXBW4-750/530	750	6750±50	6000	23500	530	2700	1800	1125	80.0	
	FXBW4-750/530	750	7150±50	6500	24000	530	2700	1800	1125	84.0	
	FXBW-1000/210	1000	7880±50	7000	25250	210	3200	2000	1300	64.0	
	FXBW-1000/210	1000	9750±50	9000	32000	210	3200	2000	1300	69.0	
	FXBW-1000/300	1000	7900±50	7000	25250	300	3200	2000	1300	65.0	
	FXBW-1000/300	1000	9750±50	9000	32000	300	3200	2000	1300	70.0	
	FXBW-1000/420	1000	7910±50	7000	25250	420	3200	2000	1300	75.0	
	FXBW-1000/420	1000	9750±50	9000	32000	420	3200	2000	1300	81.0	
	FXBW-1000/550	1000	8020±50	7000	25250	550	3200	2000	1300	81.0	
	FXBW-1000/550	1000	9750±50	9000	32000	550	3200	2000	1300	99.0	

表 C-14　　直流复合绝缘子

厂家序号	产品型号	额定电压（kV）	额定机械负荷（kN）	联结结构标记	结构高度 H（mm）	最小公称爬电距离（mm）	雷电冲击耐受电压（kV）	操作冲击耐受电压（kV）	直流 1min 湿耐受电压（kV）
1	FXBZW-±400/160-EE	±400	160	26	8000	28030	2800	1800	750
	FXBZW-±400/210-EE	±400	210	28	8000	28030	2800	1800	750
	FXBZW-±400/300-EE	±400	300	34	8000	28030	2800	1800	750
	FXBZW-±400/420-EE	±400	420	40	8000	28030	2800	1800	750
	FXBZW-±400/550-EE	±400	550	42	8000	28030	2800	1800	750
	FXBZW-±500/160-1	±500	160	20R	5440	18025	2550	1550	600
	FXBZW-±500/160-2	±500	160	20R	6290	21060	2550	1550	600
	FXBZW-±500/160-3	±500	160	20R	6800	22800	2550	1550	600
	FXBZW-±500/210-1	±500	210	20R	5440	18025	2550	1550	600
	FXBZW-±500/210-2	±500	210	20R	6290	21060	2550	1550	600
	FXBZW-±500/210-3	±500	210	20R	6800	22800	2550	1550	600
	FXBZW-±500/300-1	±500	300	24R	5440	18025	2550	1550	600
	FXBZW-±500/300-2	±500	300	24R	6290	21060	2550	1550	600
	FXBZW-±500/300-3	±500	300	24R	6800	22800	2550	1550	600

续表

厂家序号	产品型号	额定电压（kV）	额定机械负荷（kN）	联结结构标记	结构高度 H（mm）	最小公称爬电距离（mm）	雷电冲击耐受电压（kV）	操作冲击耐受电压（kV）	直流 1min 湿耐受电压（kV）
1	FXBZW-±500/420-1	±500	420	28R	5440	18025	2550	1550	600
	FXBZW-±500/420-2	±500	420	28R	6290	21060	2550	1550	600
	FXBZW-±500/420-3	±500	420	28R	6800	22800	2550	1550	600
	FXBZW-±500/550-1	±500	550	32R	5440	18025	2550	1550	600
	FXBZW-±500/550-2	±500	550	32R	6290	21060	2550	1550	600
	FXBZW-±500/550-3	±500	550	32R	6800	22800	2550	1550	600
	FXBZW-±660/160-EE-1	±660	160	20	8500	33400	2800	1800	750
	FXBZW-±660/160-EE-2	±660	160	20	9200	38400	2800	1800	750
	FXBZW-±660/210-EE-1	±660	210	20	8500	33400	2800	1800	750
	FXBZW-±660/210-EE-2	±660	210	20	9200	38400	2800	1800	750
	FXBZW-±660/300-EE-1	±660	300	24	8500	33400	2800	1800	750
	FXBZW-±660/300-EE-2	±660	300	24	9200	38400	2800	1800	750
	FXBZW-±660/420-EE-1	±660	420	28	8500	33400	2800	1800	750
	FXBZW-±660/420-EE-2	±660	420	28	9200	38400	2800	1800	750
	FXBZW-±800/160-EE-1	±800	160	26	9600	36960	3600	1950	900
	FXBZW-±800/160-EE-2	±800	160	26	10200	38250	3600	1950	900
	FXBZW-±800/160-EE-3	±800	160	26	10600	40810	3600	1950	900
	FXBZW-±800/160-EE-4	±800	160	26	11000	42350	3600	1950	900
	FXBZW-±800/160-EE-5	±800	160	26	11800	45430	3600	1950	900
	FXBZW-±800/160-EE-6	±800	160	26	12000	45000	3600	1950	900
	FXBZW-±800/160-EE-7	±800	160	26	13000	48750	3600	1950	900
	FXBZW-±800/210-EE-1	±800	210	28	9600	36960	3600	1950	900
	FXBZW-±800/210-EE-2	±800	210	28	10200	38250	3600	1950	900
	FXBZW-±800/210-EE-3	±800	210	28	10600	40810	3600	1950	900
	FXBZW-±800/210-EE-4	±800	210	28	11000	42350	3600	1950	900
	FXBZW-±800/210-EE-5	±800	210	28	11800	45430	3600	1950	900
	FXBZW-±800/210-EE-6	±800	210	28	12000	45000	3600	1950	900
	FXBZW-±800/210-EE-7	±800	210	28	13000	48750	3600	1950	900
	FXBZW-±800/240-EE-1	±800	240	30	9600	36960	3600	1950	900
	FXBZW-±800/240-EE-2	±800	240	30	10200	38250	3600	1950	900
	FXBZW-±800/240-EE-3	±800	240	30	10600	40810	3600	1950	900
	FXBZW-±800/240-EE-4	±800	240	30	11000	42350	3600	1950	900
	FXBZW-±800/240-EE-5	±800	240	30	11800	45430	3600	1950	900
	FXBZW-±800/240-EE-6	±800	240	30	12000	45000	3600	1950	900
	FXBZW-±800/240-EE-7	±800	240	30	13000	48750	3600	1950	900

续表

厂家序号	产品型号	额定电压（kV）	额定机械负荷（kN）	联结结构标记	结构高度 H（mm）	最小公称爬电距离（mm）	雷电冲击耐受电压（kV）	操作冲击耐受电压（kV）	直流 1min 湿耐受电压（kV）
1	FXBZW-±800/300-EE-1	±800	300	34	9600	36960	3600	1950	900
	FXBZW-±800/300-EE-2	±800	300	34	10200	38250	3600	1950	900
	FXBZW-±800/300-EE-3	±800	300	34	10600	40810	3600	1950	900
	FXBZW-±800/300-EE-4	±800	300	34	11000	42350	3600	1950	900
	FXBZW-±800/300-EE-5	±800	300	34	11800	45430	3600	1950	900
	FXBZW-±800/300-EE-6	±800	300	34	12000	45000	3600	1950	900
	FXBZW-±800/300-EE-7	±800	300	34	13000	48750	3600	1950	900
	FXBZW-±800/420-EE-1	±800	420	40	9600	36960	3600	1950	900
	FXBZW-±800/420-EE-2	±800	420	40	10200	38250	3600	1950	900
	FXBZW-±800/420-EE-3	±800	420	40	10600	40810	3600	1950	900
	FXBZW-±800/420-EE-4	±800	420	40	11000	42350	3600	1950	900
	FXBZW-±800/420-EE-5	±800	420	40	11800	45430	3600	1950	900
	FXBZW-±800/420-EE-6	±800	420	40	12000	45000	3600	1950	900
	FXBZW-±800/420-EE-7	±800	420	40	13000	48750	3600	1950	900
	FXBZW-±800/550-EE-1	±800	550	42	9600	36960	3600	1950	900
	FXBZW-±800/550-EE-2	±800	550	42	10200	38250	3600	1950	900
	FXBZW-±800/550-EE-3	±800	550	42	10600	40810	3600	1950	900
	FXBZW-±800/550-EE-4	±800	550	42	11000	42350	3600	1950	900
	FXBZW-±800/550-EE-5	±800	550	42	11800	45430	3600	1950	900
	FXBZW-±800/550-EE-6	±800	550	42	12000	45000	3600	1950	900
	FXBZW-±800/550-EE-7	±800	550	42	13000	48750	3600	1950	900
	FXBZW-±1100/160-EE-1	±1100	160	26	12300	47355	4500	2200	1150
	FXBZW-±1100/160-EE-2	±1100	160	26	13900	53155	4500	2200	1150
	FXBZW-±1100/160-EE-3	±1100	160	26	15400	59290	4500	2200	1150
	FXBZW-±1100/160-EE-4	±1100	160	26	16600	63910	4500	2200	1150
	FXBZW-±1100/210-EE-1	±1100	210	28	12300	47355	4500	2200	1150
	FXBZW-±1100/210-EE-2	±1100	210	28	13900	53155	4500	2200	1150
	FXBZW-±1100/210-EE-3	±1100	210	28	15400	59290	4500	2200	1150
	FXBZW-±1100/210-EE-4	±1100	210	28	16600	63910	4500	2200	1150
	FXBZW-±1100/240-EE-1	±1100	240	30	12300	47355	4500	2200	1150
	FXBZW-±1100/240-EE-2	±1100	240	30	13900	53155	4500	2200	1150
	FXBZW-±1100/240-EE-3	±1100	240	30	15400	59290	4500	2200	1150
	FXBZW-±1100/240-EE-4	±1100	240	30	16600	63910	4500	2200	1150
	FXBZW-±1100/300-EE-1	±1100	300	34	12300	47355	4500	2200	1150
	FXBZW-±1100/300-EE-2	±1100	300	34	13900	53155	4500	2200	1150

续表

厂家序号	产品型号	额定电压（kV）	额定机械负荷（kN）	联结结构标记	结构高度 H（mm）	最小公称爬电距离（mm）	雷电冲击耐受电压（kV）	操作冲击耐受电压（kV）	直流 1min 湿耐受电压（kV）
1	FXBZW-±1100/300-EE-3	±1100	300	34	15400	59290	4500	2200	1150
	FXBZW-±1100/300-EE-4	±1100	300	34	16600	63910	4500	2200	1150
	FXBZW-±1100/420-EE-1	±1100	420	40	12300	47355	4500	2200	1150
	FXBZW-±1100/420-EE-2	±1100	420	40	13900	53155	4500	2200	1150
	FXBZW-±1100/420-EE-3	±1100	420	40	15400	59290	4500	2200	1150
	FXBZW-±1100/420-EE-4	±1100	420	40	16600	63910	4500	2200	1150
	FXBZW-±1100/550-EE-1	±1100	550	42	12300	47355	4500	2200	1150
	FXBZW-±1100/550-EE-2	±1100	550	42	13900	53155	4500	2200	1150
	FXBZW-±1100/550-EE-3	±1100	550	42	15400	59290	4500	2200	1150
	FXBZW-±1100/550-EE-4	±1100	550	42	16600	63910	4500	2200	1150
	FXBZW-±1100/1000-EE-1	±1100	1000	50	12300	47355	4500	2200	1150
	FXBZW-±1100/1000-EE-2	±1100	1000	50	13900	53155	4500	2200	1150
	FXBZW-±1100/1000-EE-3	±1100	1000	50	15400	59290	4500	2200	1150
	FXBZW-±1100/1000-EE-4	±1100	1000	50	16600	63910	4500	2200	1150
2	FXBZ-±500/160	±500	160	20	5440±50	18025	2550	1550	900
	FXBZ-±500/210	±500	210	20	5440±50	18025	2550	1550	900
	FXBZ-±500/300	±500	300	24	5440±50	18025	2550	1550	900
	FXBZ-±500/420	±500	420	28	5440±50	18025	2550	1550	900
	FXBZ-±660/160	±660	160	20	7660±50	27000	3000	1800	1400
	FXBZ-±660/210	±660	210	20	7660±50	27000	3000	1800	1400
	FXBZ-±660/300	±660	300	24	7660±50	27000	3000	1800	1400
	FXBZ-±660/420	±660	420	28	7660±50	27000	3000	1800	1400
	FXBZ-±660/550	±660	550	32	7660±50	27000	3000	1800	1400
	FXBZ-±800/160-1	±800	160	环环 26/球碗 20	9600±50	36960	3600	1950	900
	FXBZ-±800/160-2	±800	160	环环 26/球碗 20	10600±50	40810	3600	1950	900
	FXBZ-±800/160-3	±800	160	环环 26/球碗 20	11000±50	42350	3600	1950	900
	FXBZ-±800/160-4	±800	160	环环 26/球碗 20	11800±50	45430	3600	1950	900
	FXBZ-±800/240-1	±800	240	环环 30/球碗 20	9600±50	36960	3600	1950	900
	FXBZ-±800/240-2	±800	240	环环 30/球碗 20	10600±50	40810	3600	1950	900
	FXBZ-±800/240-3	±800	240	环环 30/球碗 20	11000±50	42350	3600	1950	900
	FXBZ-±800/240-4	±800	240	环环 30/球碗 20	11800±50	45430	3600	1950	900

续表

厂家序号	产品型号	额定电压（kV）	额定机械负荷（kN）	联结结构标记	结构高度 H（mm）	最小公称爬电距离（mm）	雷电冲击耐受电压（kV）	操作冲击耐受电压（kV）	直流 1min 湿耐受电压（kV）
2	FXBZ-±800/300-1	±800	300	环环 34/球碗 24	9600±50	36960	3600	1950	900
	FXBZ-±800/300-2	±800	300	环环 34/球碗 24	10600±50	40810	3600	1950	900
	FXBZ-±800/300-3	±800	300	环环 34/球碗 24	11000±50	42350	3600	1950	900
	FXBZ-±800/300-4	±800	300	环环 34/球碗 24	11800±50	45430	3600	1950	900
	FXBZ-±800/420-1	±800	420	环环 40/球碗 28	9600±50	36960	3600	1950	900
	FXBZ-±800/420-2	±800	420	环环 40/球碗 28	10600±50	40810	3600	1950	900
	FXBZ-±800/420-3	±800	420	环环 40/球碗 28	11000±50	42350	3600	1950	900
	FXBZ-±800/420-4	±800	420	环环 40/球碗 28	11800±50	45430	3600	1950	900
	FXBZ-±800/550-1	±800	550	环环 42/球碗 32	9600±50	36960	3600	1950	900
	FXBZ-±800/550-2	±800	550	环环 42/球碗 32	10600±50	40810	3600	1950	900
	FXBZ-±800/550-3	±800	550	环环 42/球碗 32	11000±50	42350	3600	1950	900
	FXBZ-±800/550-4	±800	550	环环 42/球碗 32	11800±50	45430	3600	1950	900
	FXBZ-±800/160-S	±800	160	环环 26/球碗 20	10600±50	33600	3600	1950	900
	FXBZ-±800/240-S	±800	240	环环 30/球碗 20	10600±50	33600	3600	1950	900
	FXBZ-±800/300-S	±800	300	环环 34/球碗 24	10600±50	33600	3600	1950	900
	FXBZ-±800/420-S	±800	420	环环 40/球碗 28	10600±50	33600	3600	1950	900
	FXBZ-±800/550-S	±800	550	环环 42/球碗 32	10600±50	33600	3600	1950	900
	FXBZ-±1100/240	±1100	240	环环 30/球碗 20	14000±50	46500	4950	2500	1250
	FXBZ-±1100/300	±1100	300	环环 34/球碗 24	14000±50	46500	4950	2500	1250
	FXBZ-±1100/420	±1100	420	环环 40/球碗 28	14000±50	46500	4950	2500	1250
	FXBZ-±1100/550	±1100	550	环环 42/球碗 32	14000±50	46500	4950	2500	1250
	FXBZ-±1100/840	±1100	840	环环 52/球碗 40	14000±50	46500	4950	2500	1250

续表

厂家序号	产品型号	额定电压（kV）	额定机械负荷（kN）	联结结构标记	结构高度 H（mm）	最小公称爬电距离（mm）	雷电冲击耐受电压（kV）	操作冲击耐受电压（kV）	直流 1min 湿耐受电压（kV）
2	FXBZ-±1100/1000	±1100	1000	环环 53/球碗 44	14000±50	46500	4950	2500	1250
	FXBZ-±1100/240	±1100	240	环环 30/球碗 20	14200±50	46500	4950	2500	1250
	FXBZ-±1100/300	±1100	300	环环 34/球碗 24	14200±50	46500	4950	2500	1250
	FXBZ-±1100/420	±1100	420	环环 40/球碗 28	14200±50	46500	4950	2500	1250
	FXBZ-±1100/550	±1100	550	环环 42/球碗 32	14200±50	46500	4950	2500	1250
	FXBZ-±1100/840	±1100	840	环环 52/球碗 40	14200±50	46500	4950	2500	1250
	FXBZ-±1100/1000	±1100	1000	环环 53/球碗 40	14200±50	46500	4950	2500	1250
3	FXBZ-±800/210	±800	210	20	8700	31100	3600	1950	900
	FXBZ-±800/300	±800	300	24	8700	30100	3600	1950	900
	FXBZ-±800/400	±800	400	28	8700	30100	3600	1950	900
	FXBZ-±800/530	±800	530	32	8700	29800	3600	1950	900
	FXBZ-±500/160-A	±500	160	20	5440	17600	2550	1550	600
	FXBZ-±500/160-B	±500	160	20	6290	20700	2750	1650	650
	FXBZ-±500/160-C	±500	160	20	6800	22700	2950	1750	700
	FXBZ-±500/180-A	±500	180	20	5440	17600	2550	1550	600
	FXBZ-±500/180-B	±500	180	20	6290	20700	2750	1650	650
	FXBZ-±500/180-C	±500	180	20	6800	22700	2950	1750	700
	FXBZ-±500/210-A	±500	210	20	5440	17600	2550	1550	600
	FXBZ-±500/210-B	±500	210	20	6290	20700	2750	1650	650
	FXBZ-±500/210-C	±500	210	20	6800	22700	2950	1750	700
	FXBZ-±500/240-A	±500	240	20	5440	17600	2550	1550	600
	FXBZ-±500/240-B	±500	240	20	6290	20700	2750	1650	650
	FXBZ-±500/240-C	±500	240	20	6800	22700	2950	1750	700
	FXBZ-±500/300-A	±500	300	24	5440	17600	2550	1550	600
	FXBZ-±500/300-B	±500	300	24	6290	20700	2750	1650	650
	FXBZ-±500/300-C	±500	300	24	6800	22700	2950	1750	700
	FXBZ-±500/400-A	±500	400	28	5440	18000	2550	1550	600
	FXBZ-±500/400-B	±500	400	28	6290	21300	2750	1650	650
	FXBZ-±500/400-C	±500	400	28	6800	23000	2950	1750	700

C.3 地线绝缘子技术数据

地线绝缘子型式见图 C-8。地线绝缘子技术数据见表 C-15。

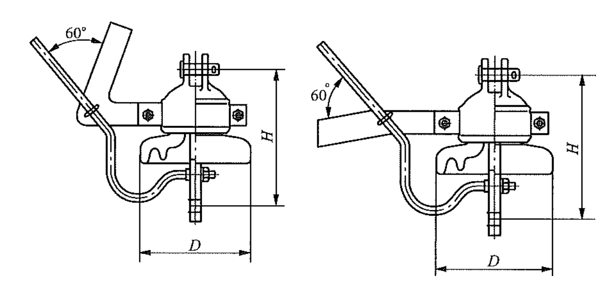


图 C-8 地线绝缘子

表 C-15 地线绝缘子

厂家序号	产品型号	图号	盘径（mm）	高度（mm）	泄漏距离（mm）	20mm 间隙工频放电电压（kV）		15mm 间歇 2500V 时熄弧电流（A）		电极耐弧能力（不小于）			1 小时机电负荷（kN）	工频击穿电压幅值（kV）	额定机电破坏（kN）	例行拉伸负荷（kN）	悬挂方式	质量（kg）	符合标准
						上限值	下限值	感性电流	容性电流	工频电流（kA）	时间（s）	次数							
1	XDP-70C	悬垂式	160/170	200	160/170	30	8	35	20	10	0.2	2	52.5	120	70	35	悬垂	4.7	IEC GB
	XDP-70CN	耐张式	160/170	200	160/170	30	8	35	20	10	0.2	2	52.5	120	70	35	耐张	4.7	
	XDP-100C	悬垂式	170	210	170	30	8	35	20	10	0.2	2	75	120	100	50	悬垂	5.6	
	XDP-100CN	耐张式	170	210	170	30	8	35	20	10	0.2	2	75	120	100	50	耐张	5.6	
2	LXDY-70C	悬垂式	200	210	220	30	8	35	20	10	0.2	2	52.5	130	70		悬垂	4.7	IEC BS AS ANSI
	LXDY-70CN	耐张式	200	210	220	30	8	35	20	10	0.2	2	52.5	130	70		耐张	4.7	
	LXDY-100C	悬垂式	200	210	220	30	8	35	20	10	0.2	2	75	130	100		悬垂	4.7	
	LXDY-100CN	耐张式	200	210	220	30	8	35	20	10	0.2	2	75	130	100		耐张	4.7	
	LXDY-120C	悬垂式	200	210	220	30	8	35	20	10	0.2	2	90	130	120		悬垂	4.9	
	LXDY-120CN	耐张式	200	210	220	30	8	35	20	10	0.2	2	90	130	120		耐张	4.9	
3	XDP（2）-70C	悬垂式	160/170	200	160/170	30	8	35	20	10	0.2	2	52.5	110	70	35	悬垂	4.7	IEC ANSI AS BS
	XDP（2）-70CN	耐张式	160/170	200	160/170	30	8	35	20	10	0.2	2	52.5	110	70	35	耐张	4.7	
	XDP1-70C	悬垂式	170	190	170	30	8	35	20	10	0.2	2	52.5	110	70	35	悬垂	4.7	
	XDP1-70CN	耐张式	170	190	170	30	8	35	20	10	0.2	2	52.5	110	70	35	耐张	4.7	
	XDP-100C	悬垂式	170	210	170	30	8	35	20	10	0.2	2	75	110	100	50	悬垂	5.6	
	XDP-100CN	耐张式	170	210	170	30	8	35	20	10	0.2	2	75	110	100	50	耐张	5.6	
4	FC70C/200	悬垂式	175	200	200	30	8	35	20	10	0.2	2	52.5	130	70		悬垂	4.0	IEC GB BS
	FC70CN/200	耐张式	175	200	200	30	8	35	20	10	0.2	2	52.5	130	70		耐张	4.0	
	FC100C/200	悬垂式	200	200	217	30	8	35	20	10	0.2	2	75	130	100		悬垂	4.5	
	FC100CN/200	耐张式	200	200	217	30	8	35	20	10	0.2	2	75	130	100		耐张	4.5	

附录D 金 具

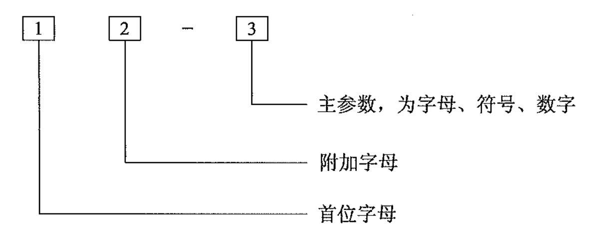
D.1 电力金具产品型号及说明

本附录参照了DL/T 683—2010《电力金具产品型号命名方法》的相关方法及要求。

D.1.1 型号的表示方法

电力金具产品型号标记一般由汉语拼音字母（以下简称字母）和阿拉伯数字（以下简称数字）组成，不应使用罗马数字或其他数字。标记中使用的字母应采用大写汉语拼音字母，I和O不应使用。字母不应加角标。标记中使用的符号应采用乘号（*）、左斜杠（/）、短划（–）、小数点（.）。

D.1.2 型号的组成



（1）首位字母。型号标记首位字母的代表含义是：①分类类别；②连接金具的产品系列名称。

首位字母用金具类别或名称的第一个汉字的汉语拼音的第一个字母表示。当首位字母出现重复时，或需使用字母I和O时，可选用金具类别或名称的第二个汉字的汉语拼音的第一个字母表示，也可选用其他字母表示，或用附加字母来区分。

首位字母代表的含义见表D-1。

表D-1 首位字母含义

字母	表示类别	表示连接金具类的产品系列名称
D		调整板
E		EB挂板
F	防护金具	
G		GD挂板
J	接续金具	
L		联板
M	母线金具	
N	耐张线夹	
P		平行
Q		球头
S	设备线夹	
T	T接线夹	
U		U形
V		V形挂板
W		碗头
X	悬垂线夹	
Y		延长
Z		直角

（2）附加字母。附加字母是对首位字母的补充表示，以区别不同的型式、结构、特性和用途，同一字母允许表示不同的含义。一般附加字母代表的含义见表D-2（但不限于表D-2）。

表D-2 一般附加字母代表的含义

字母	代 表 含 义
B	板、爆压、并（沟）、变（电）、避（雷）、包
C	槽（形）、垂（直）
D	倒（装）、单（板、联、线）、导（线）、搭（接）、镀锌、跑（道）
F	方（形）、封（头）、防（晕、盗、振、滑）、覆（铜）
G	固（定）、过（渡）、管（形）、沟、钢、间隔垫
H	护（线）、环、弧、合（金）
J	均（压）、矩（形）、间（隔）、支（架）、加（强）、（预）绞、绝
K	卡（子）、（上）扛、扩（径）
L	螺（栓）、立（放）、拉（杆）、菱（形）、轮（形）、铝
N	耐（热、张）、（户）内
P	平（行、面、放）、屏（蔽）
Q	球（绞）、轻（型）、牵（引）
R	软（线）
S	双（线、联）、三（腿）、伸（缩）、设（备）
T	T（形）、椭（圆）、跳（线）、（可）调
U	U（形）
V	V（形）

续表

字母	代表含义
W	（户）外
X	楔（形）、悬（垂）、悬（挂）、下（垂）、修（补）
Y	液压、圆（形）、（牵）引
Z	组（合）、终（端）、重（锤）、自（阻尼）

（3）主参数。主参数中的数字用以表述下列中的一种或多种组合：

1）表示适用于导线的标称截面面积（mm^2）或直径（mm）；

2）当产品可适用于多个标号的导线时，为简化主参数数字，采用组合号以代表相应范围内的导线标称直径，或按不同产品型号单独设组合号，见表 D-3；

3）表示标称破坏荷重标记，按 GB/T 2315 的规定执行；

4）表示间距（mm、cm）；

5）表示母线规格（mm、mm^2）；

6）表示母线片数及顺序号；

7）表示导线根数；

8）表示圆杆的直径或长度（mm、cm）。

表 D-3　组　合　号　mm

组合号	导地线直径 D	
	用于导线	用于地线
0	$5.4 \leqslant D < 8.0$	
1	$8.0 \leqslant D < 12.0$	$6.4 \leqslant D < 8.6$
2	$12.0 \leqslant D < 16.0$	$8.6 \leqslant D < 12.0$
3	$16.0 \leqslant D < 18.0$	$12.0 \leqslant D < 14.5$
4	$18.0 \leqslant D < 22.5$	$14.5 \leqslant D < 17$
5	$22.5 \leqslant D < 30.0$	$17 \leqslant D < 20$
6	$30.0 \leqslant D < 35.0$	$20 \leqslant D < 23$
7	$35.0 \leqslant D < 39.0$	
8	$39.0 \leqslant D < 45.0$	
9	$45.0 \leqslant D < 51.0$	
10	$51.0 \leqslant D < 70.0$	

（4）字母。主参数中的字母是补充性的区分标记，字母代表的含义分述如下：

1）以 A、B、C 作为区分标记，见表 D-4。

表 D-4　区　分　标　记

区分	区分总长度	区分引流角度（°）	区分附属构件
A	短形	0	附碗头挂板
B	长形	30	附 U 型挂板
C		90	

2）以字母作为区分导线型号标记，导线的型号和名称表示方法按 GB/T 1179 执行，见表 D-5。

表 D-5　导线的型号和名称对应表

型　号	名称
JL	铝绞线
JLHA2、JLHA1	铝合金绞线
JL/G1A、JL/G1B、JL/G2A、JL/G2B、JL/G3A	钢芯铝绞线
JL/G1AF、JL/G2AF、JL/G3AF	防腐性钢芯铝绞线
JLHA2/G1A、JLHA2/G1B、JLHA2/G3A	钢芯铝合金绞线
JLHA1/G1A、JLHA1/G1B、JLHA1/G3A	钢芯铝合金绞线
JL/LHA2、JL/LHA1	铝合金芯铝绞线
JL/LB1A	铝包钢芯铝绞线
JLHA2/LB1A、JLHA1/LB1A	铝包钢芯铝合金绞线
JG1A、JG1B、JG2A、JG3A	钢绞线
JLB1A、JLB1B、JLB2	铝包钢绞线
T	铜绞线
K	扩径导线

3）其他的含义见表 D-2。

D.1.3　产品型号命名的管理

（1）新产品型号的命名不应与已有的型号重复。其汉语表述应符合 GB/T 5075 的规定。

（2）已有产品改进设计，如主参数和性能不变或只是不同形态，可沿用原有产品名称和型号，仅需在原型号标记的最后加（*），再以 A、B、C、D、…、Y、Z 表示改进顺序，并在技术文件中加以说明。

D.1.4　金具产品说明

本附录所附金具产品是以部分金具厂家提供的产品样本为主，以供用户参考使用。

D.2　悬垂线夹

D.2.1　上扛式悬垂线夹

上扛式悬垂线夹见图 D-1 和表 D-6。

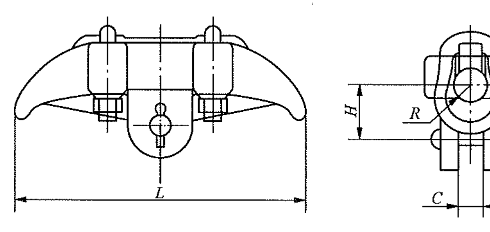


图 D-1 上扛式悬垂线夹

表 D-6 上扛式悬垂线夹

型号	适用绞线直径（含包缠物）（mm）	主要尺寸（mm）					破坏荷重（kN）	质量（kg）
		H	*L*	*R*	*C*	*M*		
XGF-5K	24.2～32.0	55	300	16.0	24	16	60	3.0
XGF-5K/GH	24.2～32.0	55	300	16.0	24	16	59	3.7
XFK-8038	33.0～38.0	60	330	19.5	24	16	80	3.6
XFK-8044	34.0～43.0	57	300	22.0	24	16	80	4.3

D.2.2 提包式悬垂线夹

提包式悬垂线夹见图 D-2 和表 D-7。

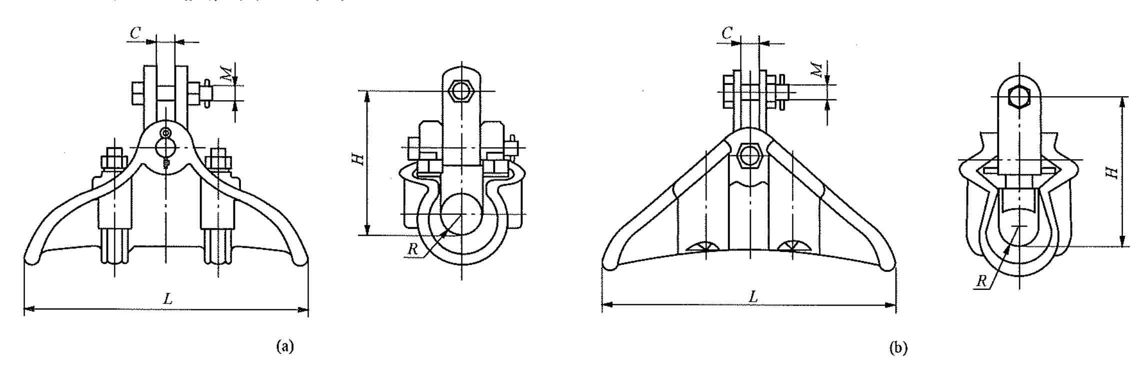


图 D-2 提包式悬垂线夹

表 D-7 提包式悬垂线夹

型号	适用绞线直径（含包缠物）（mm）	主要尺寸（mm）					破坏荷重（kN）	质量（kg）
		H	*L*	*R*	*C*	*M*		
XGF-4X	20.0～25.0	143	300	13	20	16	60	3.0
XGF-5X	24.2～32.0	145	300	16	20	16	60	3.5
XGF-6X	34.0～43.0	145	300	22	20	18	90	4 8
XGF-7X	40.0～52.0	191	350	26	20	18	100	5.8
XGF-8034	28.0～33.0	167	390	17	24	18	80	7 3
CGF-10030	24.0～29.0	145	300	15	22	18	100	4.0
XGF-10034	28.0～33.0	187	390	17	24	18	100	7.9
XF-8038	33.0～38.0	155	330	19.5	22	16	80	4.5
CGF-10040	34.0～39.0	145	300	20.0	22	18	100	4.6
CF-10048	36.0～47.0	170	420	24.0	30	18	100	6.0

D.2.3　悬垂线夹（带碗头挂板）

悬垂线夹（带碗头挂板）见图 D-3 和表 D-8。

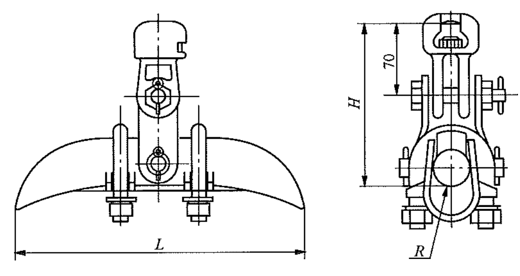


图 D-3　悬垂线夹（带碗头挂板）

表 D-8　　悬垂线夹（带碗头挂板）

型号	适用绞线直径（含包缠物）（mm）	主要尺寸（mm）			破坏荷重（kN）	质量（kg）
		H	*L*	*R*		
XGU-5A	23.0～33.0	157	300	17.0	70	5.7
XGU-6A	34.0～45.0	163	300	23.0	70	6.1

D.2.4　悬垂线夹（双导线用）

悬垂线夹（双导线用）见图 D-4 和表 D-9。

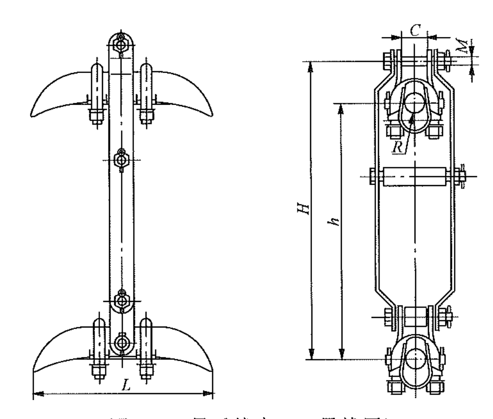


图 D-4　悬垂线夹（双导线用）

表 D-9　　悬垂线夹（双导线用）

型号	适用绞线直径（含包缠物）（mm）	主要尺寸（mm）						破坏荷重（kN）	质量（kg）
		h	*H*	*L*	*R*	*C*	*M*		
XCS-4	21.1～26.0	400	495	250	13.5	20	16	60	9.3
XCS-5	23.0～33.0	400	490	300	17.0	38	18	100	10.8
XCS-6	34.0～45.0	400	495	300	23.0	38	18	100	12.5
XCS-7	45.0～48.7	400	490	300	26.0	42	18	100	12.4
XCS-4/600	21.1～26.0	600	690	250	13.5	40	16	70	11.0
XCS-4/800	21.1～26.0	800	890	250	13.5	40	16	70	12.6
XCS-5/800	23.0～33.0	800	890	300	17.0	40	16	60	14.2

续表

型号	适用绞线直径（含包缠物）（mm）	主要尺寸（mm）						破坏荷重（kN）	质量（kg）
		h	*H*	*L*	*R*	*C*	*M*		
XCS-6/500	34.0～45.0	500	621	300	23.0	46	16	60	15.0
XCS-6B	34.0～45.0	400	521	300	23.0	46	18	100	12.7
XCS-5C	23.0～33.0	400	490	300	17.0	48	18	120	14.6
XCS-6C	34.0～45.0	400	495	350	23.0	48	24	160	15.8
XCS-7C	45.0～48.7	400	495	350	26.0	48	24	160	16.9

D.2.5 悬垂线夹（中心回转式）

悬垂线夹（中心回转式）见图 D-5 和表 D-10。

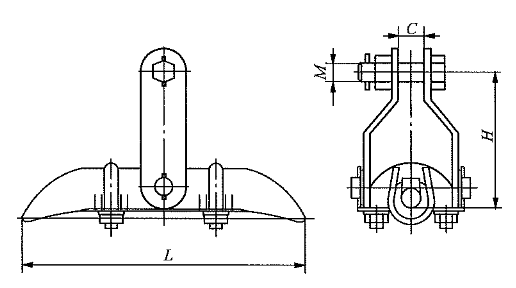


图 D-5 悬垂线夹（中心回转式）

表 D-10　　悬垂线夹（中心回转式）

型号	适用绞线直径（含包缠物）（mm）	主要尺寸（mm）					破坏荷重（kN）	质量（kg）
		H	*L*	*R*	*C*	*M*		
XGU-1	5.0～7.0	82	180	4.0	18	16	40	1.4
XGU-2	7.1～13.0	82	200	7.0	18	16	40	1.8
XGU-3	13.1～21.0	102	220	11.0	18	16	40	2.0
XGU-4	21.1～26.0	110	250	13.5	18	16	40	3.0
XGU-5C	23.0～33.0	87	300	17.0	22	18	60	4.7
XGU-6C	34.0～45.0	118	350	23.0	48	24	77	7.9
XGU-7C	45.0～48.7	121	350	26.0	48	24	77	8.9

D.2.6 悬垂线夹（防磨型）

悬垂线夹（防磨型）见图 D-6 和表 D-11。

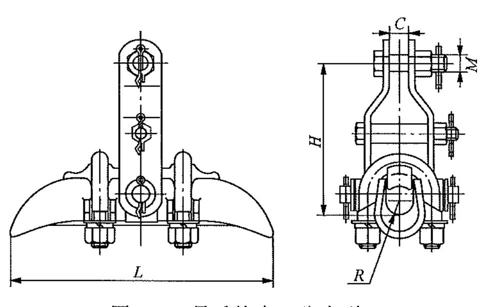


图 D-6 悬垂线夹（防磨型）

表 D-11　　悬垂线夹（防磨型）

型号	适用绞线直径（含包缠物）（mm）	主要尺寸（mm）					破坏荷重（kN）	质量（kg）
		H	L	R	C	M		
XGU-1F	5.0～7.0	102	180	4.0	18	16	40	1.6
XGU-2F	7.1～13.0	102	200	7.0	18	16	40	2.4
XGU-3F	13.1～21.0	121	220	11.0	18	16	40	2.5
XGU-4F	21.1～26.0	144	250	13.5	19	16	40	4.0
XGU-5F	23.0～33.0	157	300	17.0	20	18	60	4.5
XGU-6F	34.0～45.0	178	300	23.0	20	18	60	5.0

D.2.7　跳线悬垂线夹（双导线跳线用）

跳线悬垂线夹（双导线跳线用）见图 D-7 和表 D-12。

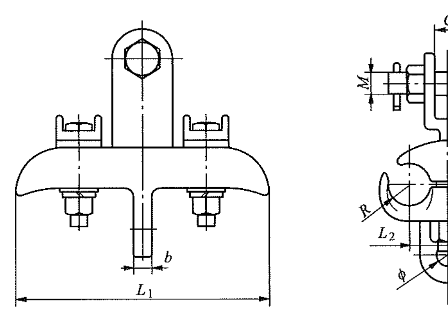


图 D-7　跳线悬垂线夹（双导线跳线用）

表 D-12　　跳线悬垂线夹（双导线跳线用）

型号	适用绞线直径（含包缠物）（mm）	主要尺寸（mm）									破坏荷重（kN）	质量（kg）
		ϕ	R	L_1	L_2	M	C	h	H	b		
XTS-1	21.0～25.0	—	13	200	50	16	19	—	77	—	70	3.4
XTS-2	25.0～31.0	18	16	200	56	16	18	62	77	16	70	5.0
XTS-5	23.0～33.0	18	17	200	60	18	20	55	70	16	100	4.2
XTS-6	34.0～45.0	18	23	250	77	16	20	70	103	18	70	7.5
XTS-2A	17.0～21.0	18	11	200	50	16	18	57	76	15	70	4.5
XTS-2B	21.0～27.0	18	14	200	52	16	18	59	77	16	70	5.0
XTS-2C	29.0～35.0	18	18.5	200	70	16	19	70	61.5	16	40	6.5

D.2.8　跳线悬垂线夹（四分裂导线跳线用）

跳线悬垂线夹（四分裂导线跳线用）见图 D-8 和表 D-13。

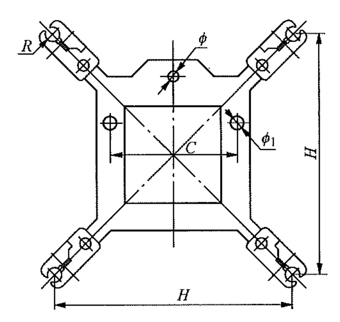


图 D-8　跳线悬垂线夹（四分裂导线跳线用）

表 D-13　　跳线悬垂线夹（四分裂导线跳线用）

型号	适用绞线直径（含包缠物）（mm）	主要尺寸（mm）					质量（kg）
		H	C	ϕ	R	ϕ_1	
XT4	23.0～27.0	450	240	18	13.5	26	8.4
XT-445/400	26.0～32.0	450	240	18	16.0	26	8.4
XT-445/500	28.0～33.0	450	240	18	17.0	26	8.4
XT4-45500	26.0～32.0	450	240	18	16.0	26	8.3
XT4-45630	28.0～34.0	450	240	18	17.0	26	8.8
XT4-50630	28.0～34.0	500	240	18	17.0	26	10.6

D.3　耐张线夹

D.3.1　耐张线夹（螺栓型）

耐张线夹（螺栓型）见图 D-9 和表 D-14。

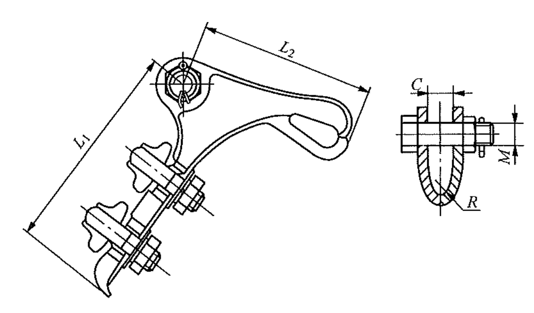


图 D-9　耐张线夹（螺栓型）

表 D-14　　耐 张 线 夹（螺 栓 型）

型号	适用绞线直径（含包缠物）（mm）	主要尺寸（mm）					U 型螺栓		破坏荷重（kN）	质量（kg）
		M	C	L_1	L_2	R	数量（pc）	直径（mm）		
NLD-1	5.1～10.0	16	18	150	120	6.5	2	12	20	1.3
NLD-2	10.1～14.0	16	18	207	135	8.0	3	12	40	2.4
NLD-3	14.1～18.0	18	22	310	160	11.0	4	16	70	4.6
NLD-4	18.1～23.0	18	27	375	200	12.5	4	16	100	7.1

D.3.2 绝缘导线用耐张线夹（楔型）

绝缘导线用耐张线夹（楔型）见图 D-10 和表 D-15。

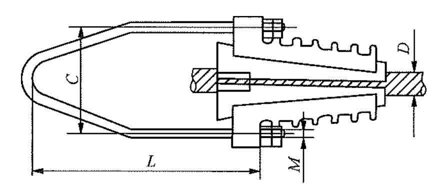


图 D-10 绝缘导线用耐张线夹（楔型）

表 D-15 绝缘导线用耐张线夹（楔型）

型号	适用导线	主要尺寸（mm）				握力（kN）	质量（kg）
		M	C	D	L		
NX-240LY-10	JKLYJ-240	12	128	27	140～240	22.5	2.0
NX-185LY-10	JKLYJ-185	12	128	27	140～240	17.3	2.0
NX-150LY-10	JKLYJ-150	12	128	23	140～240	13.6	2.0
NX-120LY-10	JKLYJ-120	12	128	23	140～240	11.3	2.0
NX-95LY-10	JKLYJ-95	12	108	20	140～240	8.9	1.6
NX-70LY-10	JKLYJ-70	12	108	20	140～240	6.7	1.6
NX-50LY-10	JKLYJ-50	12	108	18	140～220	4.6	1.6
NX-35LY-10	JKLYJ-35	10	92	12	160～220	3.4	1.0

D.3.3 耐张线夹（液压型）

耐张线夹（液压型）见图 D-11 和表 D-16。

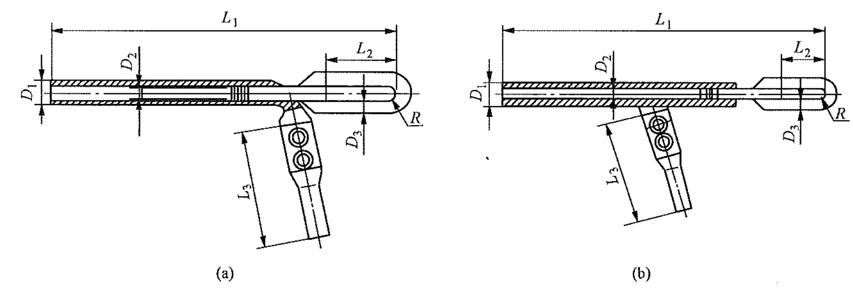


图 D-11 耐张线夹（液压型）

表 D-16 耐张线夹（液压型）

型号	适用导线	主要尺寸（mm）							握力（kN）	质量（kg）	简图
		D_1	D_2	D_3	L_1	L_2	L_3	R			
NY-50/8	LGJ-50/8	18	8	12	345	50	160	8	16.1	—	图 D-11（a）
NY-50/30	LGJ-50/30	32	16	16	430	60	170	8.5	41.0	1.4	图 D-11（a）
NY-60/35	LGJ-60/35	32	16	16	450	60	170	8.5	46.5	1.6	图 D-11（a）
NY-70/40	LGJ-70/40	32	18	16	450	50	170	8.5	55.0	2.1	图 D-11（a）
NY-95/15	LGJ-95/15	30	14	16	425	55	220	10	33.0	2.0	图 D-11（a）

续表

型号	适用导线	主要尺寸（mm）							握力（kN）	质量（kg）	简图
		D_1	D_2	D_3	L_1	L_2	L_3	R			
NY-95/20	LGJ-95/20	30	14	16	420	60	170	8.5	38.8	2.1	图 D-11（a）
NY-95/55	LGJ-95/55	34	22	18	416	50	220	11	74.0	2.4	图 D-11（a）
NY-95/140	LGJ-95/140	45	30	24	615	80	245	14.5	163.0	5.8	图 D-11（a）
NY-120/7	LGJ-120/7	30	8	12	425	55	220	10	26.2	1.86	图 D-11（a）
NY-120/20	LGJ-120/20	30	14	12	455	55	220	10	39.0	1.9	图 D-11（a）
NY-120/25	LGJ-120/25	30	14	12	485	55	220	10	45.5	1.9	图 D-11（a）
NY-120/70	LGJ-120/70	36	22	20	520	70	240	12.5	93.5	3.0	图 D-11（a）
NY-150/20	LGJ-150/20	30	14	16	410	55	210	8.0	44.0	1.8	图 D-11（a）
NY/150/25	LGJ-150/25	26	14	16	480	55	230	8.5	51.4	3.6	图 D-11（a）
NY-150/35	LGJ-150/35	30	16	16	475	55	210	9.0	61.0	2.0	图 D-11（a）
NY-185/25	LGJ-185/25	34	14	16	475	70	230	9.5	56.4	2.5	图 D-11（a）
NY-185/30	LGJ-185/30	34	16	16	470	55	220	9.0	62.0	2.5	图 D-11（a）
NY-185/45	LGJ-185/45	34	18	16	495	70	230	10	76.0	2.6	图 D-11（a）
NY-240/30	LGJ-24/30	36	16	18	500	55	240	10	72.0	2.9	图 D-11（a）
NY-240/40	LGJ-240/40	36	16	18	515	55	240	10	79.0	3.1	图 D-11（a）
NY-240/55	LGJ-240/55	36	20	18	535	55	250	11	97.0	3.2	图 D-11（a）
NY-300/15	LGJ-300/15	40	14	16	490	50	265	11	65.0	3.6	图 D-11（a）
NY-300/20	LGJ-300/20	40	14	18	505	55	265	11	72.0	3.6	图 D-11（a）
NY-300/25	LGJ-300/25	40	14	18	515	55	265	11	79.0	3.5	图 D-11（a）
NY-300/40	LGJ-300/40	40	16	18	535	55	265	11	88.0	3.5	图 D-11（a）
NY-300/50	LGJ-300/50	40	18	18	560	65	265	12	98.0	3.9	图 D-11（a）
NY-300/70	LGJ-300/70	42	22	20	600	70	265	12	122.0	4.5	图 D-11（a）
NY-322/52	LGJ-322/52	42	20	20	615	70	265	12	106.0	4.2	图 D-11（a）
NY-400/20	LGJ-400/20	45	14	18	540	55	280	13	84.0	4.3	图 D-11（a）
NY-400/25	LGJ–400/25	45	14	18	550	55	280	13	91.0	4.3	图 D-11（a）
NY-400/35	LGJ-400/35	45	16	20	580	65	280	13	99.0	4.6	图 D-11（a）
NY-400/50	LGJ-400/50	45	20	20	590	65	280	13	117.0	4.8	图 D-11（a）
NY-400/65	LGJ-400/65	48	22	22	620	70	280	13	123.0	5.4	图 D-11（a）
NY-400/95	LGJ-400/95	48	26	26	670	80	280	15	163.0	7.1	图 D-11（a）
NY-500/35	LGJ-500/35	52	16	20	620	65	245	14	114.0	6.0	图 D-11（b）
NY-500/45	LGJ-500/45	52	18	20	625	70	245	14	122.0	5.5	图 D-11（b）
NY-500/65	LGJ-500/65	52	22	22	660	70	245	15	146.0	6.6	图 D-11（b）
NY-630/45	LGJ-630/45	60	18	22	660	70	290	16	141.0	7.7	图 D-11（b）
NY-630/55	LGJ-630/55	60	20	22	660	70	290	16	156.0	7.9	图 D-11（b）

续表

型号	适用导线	主要尺寸（mm）							握力（kN）	质量（kg）	简图
		D_1	D_2	D_3	L_1	L_2	L_3	R			
NY-630/80	LGJ-630/80	60	24	26	715	80	290	17	183.0	9.1	图 D-11（b）
NY-800/55	LGJ-800/55	65	20	26	740	80	335	19	182.0	10.5	图 D-11（b）
NY-800/70	LGJ-800/70	65	22	26	745	85	335	19	197.0	10.6	图 D-11（b）
NY-800/100	LGJ-800/100	65	26	30	780	85	335	19	229.0	12.1	图 D-11（b）

D.3.4 钢绞线用耐张线夹（液压型）

钢绞线用耐张线夹（液压型）见图 D-12 和表 D-17。

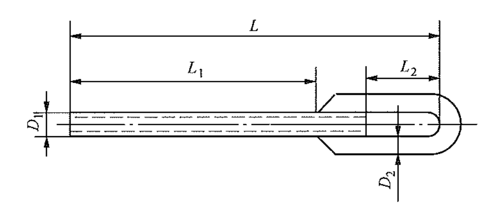


图 D-12 钢绞线用耐张线夹（液压型）

表 D-17 钢绞线用耐张线夹（液压型）

型号	钢绞线外径（mm）	主要尺寸（mm）					握力（kN）	质量（kg）
		D_1	D_2	L_1	L_2	L		
NY-35G	7.8	16	16	115	50	210	45.0	0.6
NY-50G	9.0	18	16	130	55	230	60.0	0.7
NY-50GC	9.0	20	16	155	55	260	70.0	0.8
NY-60G	10.0	20	16	135	100	280	73.0	1.2
NY-70G	11.0	22	18	155	110	315	88.0	1.3
NY-70GC	11.0	26	20	160	70	285	96.0	1.2
NY-80G	11.5	24	18	170	75	300	90.2	1.2
NY-80GC	11.5	26	20	170	120	335	103	1.4
NY-100G	13.0	26	20	185	135	365	123.0	1.7
NY-100GE	13.0	30	22	220	75	370	150.5	2.2
NY-120G	14.0	28	22	195	70	325	143.0	1.9
NY-120GD	14.0	32	24	210	90	365	175.0	2.7
NY-125G	14.5	32	22	250	80	400	165.0	2.6
NY-135G	15.0	30	22	215	80	365	164.0	2.4
NY-135GC	15.0	32	24	256	85	405	196.0	2.9
NY-150G	16.0	32	24	230	90	390	187.0	2.8
NY-150GC	16.0	34	26	285	107	477	199.0	3.1
NY-165GC	16.8	35	26	290	98	468	223.0	3.2
NY-180G	17.5	37	30	290	110	490	268.0	5.0

D.3.5 铝包钢绞线用耐张线夹（液压型）

铝包钢绞线用耐张线夹（液压型）见图 D-13 和表 D-18。

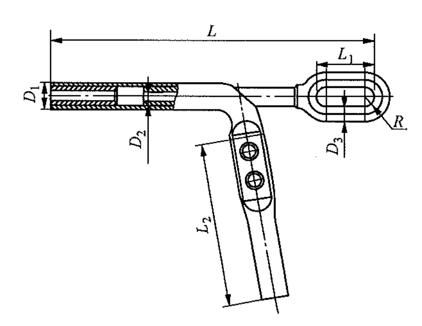


图 D-13 铝包钢绞线用耐张线夹（液压型）

表 D-18 铝包钢绞线用耐张线夹（液压型）

型号	主要尺寸（mm）							握力（kN）	质量（kg）
	D_1	D_2	D_3	L	L_1	L_2	R		
NY-120BG-20	42	30	22	488	83	240	13	138.9	3.8
NY-120BG-40	36	24	18	450	60	235	12	71.5	2.7
NY-150BG-20	45	32	26	560	110	280	16	169.6	7.3
NY-150BG-40	38	26	18	445	77	255	12	87.4	3.2

D.4 连接金具

D.4.1 球头挂环（Q、QP 型）

球头挂环（Q、QP 型）见图 D-14 和表 D-19。

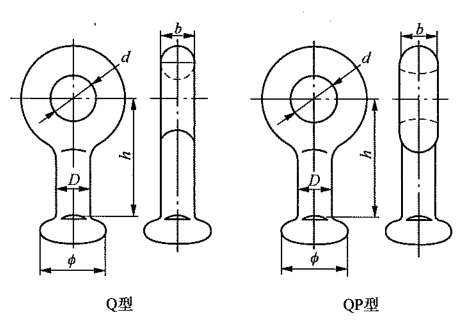


图 D-14 球头挂环（Q、QP 型）

表 D-19 球头挂环（Q、QP 型）

型号	主要尺寸（mm）					破坏荷重（kN）	质量（kg）	连接标记
	ϕ	D	h	d	b			
QP-4	22.8	12	35	13.5	12	40	0.1	11
Q-7	33.3	17	50	22	16	70	0.3	16
QP-7	33.3	17	50	20	16	70	0.3	16
QP-10	33.3	17	50	20	16	100	0.3	16
QP-12	33.3	17	55	24	17	120	0.4	16

续表

型号	主要尺寸（mm）					破坏荷重（kN）	质量（kg）	连接标记
	ϕ	D	h	d	b			
QP-16	41.0	21	60	26	20	160	0.5	20
QP-1680	41.0	21	80	26	18	160	0.6	20
QP-21	48.0	24	70	29	24	210	1.0	24
QP-25	49.0	25	80	33	28	250	1.1	24
QP-30	49.0	25	80	39	28	300	1.1	24
QP-16S	41.0	21	60	26	18	160	0.5	20
QP-21D	41.0	21	70	29	21	210	1.0	20
QP-21S	41.0	21	80	26	20	210	0.7	20
QP-25S	49.0	25	80	30	24	250	1.0	24
QP-32S	49.0	25	80	33	28	320	1.2	24
QP-42S	57.0	29	100	39	32	420	1.5	28
QP-53S	65.0	33	110	45	36	530	2.6	32

D.4.2　球头挂环（QH 型）

球头挂环（QH 型）见图 D-15 和表 D-20。

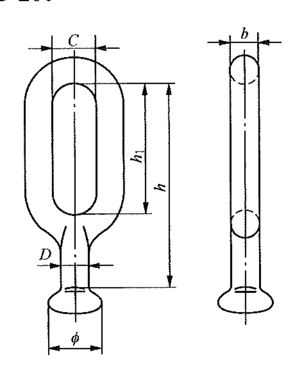


图 D-15　球头挂环（QH 型）

表 D-20　　　球头挂环（QH 型）

型号	主要尺寸（mm）						破坏荷重（kN）	质量（kg）	连接标记
	ϕ	h	h_1	C	D	b			
QH-7	33.3	114	57	24	17	16	70	0.6	16
QH-10	33.3	110	60	22	17	18	100	0.8	16
QH-12	33.3	120	70	22	17	18	120	0.9	16
QH-16	41.0	127	80	34	21	20	160	1.2	20
QH-16S	41.0	155	100	34	21	20	160	1.2	20
QH-21S	41.0	155	100	34	21	20	210	1.2	20
QH-21220S	41.0	220	150	34	21	20	210	1.7	20

续表

型号	主要尺寸（mm）						破坏荷重（kN）	质量（kg）	连接标记
	ϕ	h	h_1	C	D	b			
QH-25S	49.0	165	100	34	25	24	250	1.8	24
QH-32S	49.0	175	110	34	25	28	320	2.2	24
QH-32140S	49.0	140	85	34	25	25	320	2.0	24
QH-42S	57.0	200	120	40	29	32	420	3.4	28
Q-16Q	41.0	127	76	26	21	22	160	1.0	20
Q-21Q	41.0	138	80	26	21	20	210	1.1	20
Q-30Q	49.0	150	85	30	25	25	300	2.0	24

D.4.3　球头挂环（环孔平行型）

球头挂环（环孔平行型）见图 D-16 和表 D-21。

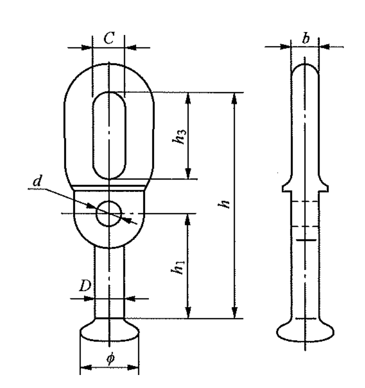


图 D-16　球头挂环（环孔平行型）

表 D-21　　球头挂环（环孔平行型）

型号	主要尺寸（mm）								破坏荷重（kN）	质量（kg）	连接标记
	ϕ	h	h_1	h_3	C	D	b	d			
Q-7M	33.3	136	40	55	20	16	16	14	70	1.1	16
Q-7AH	33.3	130	60	50	18	16	16	14	70	1.0	16
QH-10N	33.3	163	62	55	22	17	16	14	100	1.5	16
Q-12AH	33.3	145	42	70	22	17	18	14	120	1.2	16
Q-12M	33.3	145	40	70	24	17	16	14	120	1.3	16
Q-12AH	33.3	145	42	70	22	17	18	14	120	1.2	16
Q-20MI	41.0	145	56	65	30	21	20	14	200	1.4	20

D.4.4　球头挂环（环孔垂直型）

球头挂环（环孔垂直型）见图 D-17 和表 D-22。

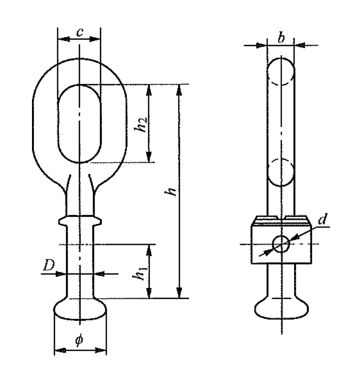


图 D-17　球头挂环（环孔垂直型）

表 D-22　　球头挂环（环孔垂直型）

型号	主要尺寸（mm）								破坏荷重（kN）	质量（kg）	连接标记
	ϕ	h	h_1	h_2	c	D	b	d			
Q-7N	33.3	142	42	50	25	16	16	14	70	1.0	16
Q-10N	33.3	138	42	52	22	16	18	12.5	100	1.1	16
Q-12N	33.3	173	56	64	24	18	18	14	120	1.2	16
Q-16N	41.0	168	42	75	30	20	20	14	160	1.2	20
Q-21N	41.0	185	56	78	26	21	20	12.5	210	1.3	20

D.4.5　球头挂板

球头挂板见图 D-18 和表 D-23。

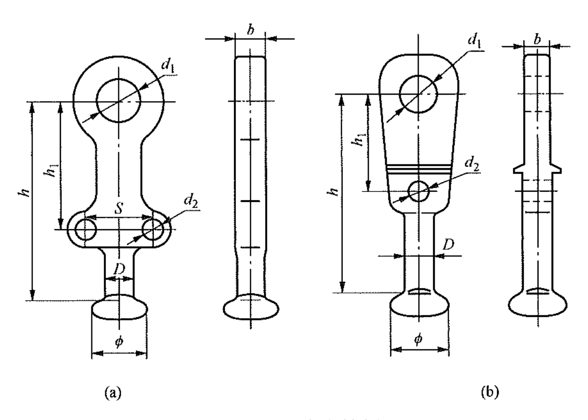


图 D-18　球头挂板

表 D-23　　球　头　挂　板

型号	主要尺寸（mm）								破坏荷重（kN）	质量（kg）	连接标记	简图
	ϕ	h	h_1	D	d_1	d_2	b	s				
Q-7P	33.3	102	60	17	18	14	16		70	1.1	16	图 D-18（b）
Q-10P	33.3	100	58	16	20	12.5	16		100	1.2	16	图 D-18（b）
Q-12P	33.3	122	65	17	24	14	16		120	1.3	16	图 D-18（b）
Q-16P	41.0	130	70	21	26	14	20		160	1.0	20	图 D-18（b）
QP-7AH	33.3	130	60	17	18	14	16		70	0.8	16	图 D-18（b）

续表

型号	主要尺寸（mm）								破坏荷重（kN）	质量（kg）	连接标记	简图
	ϕ	h	h_1	D	d_1	d_2	b	s				
QP-16AH	41.0	140	70	21	26	14	18		160	0.9	20	图 D-18（b）
QP-21A	41.0	120	65	21	29	14	24		210	1.4	20	图 D-18（b）
QP-32AS	49.0	175	115	25	33	18	28	60	320	2.5	24	图 D-18（a）
QP-32AH	49.0	175	115	25	39	18	28	60	320	2.5	24	图 D-18（a）
QP-42AS	57.0	140	75	29	39	18	32	80	420	2.8	28	图 D-18（a）

D.4.6　碗头挂板（W 型）

碗头挂板（W 型）见图 D-19 和表 D-24。

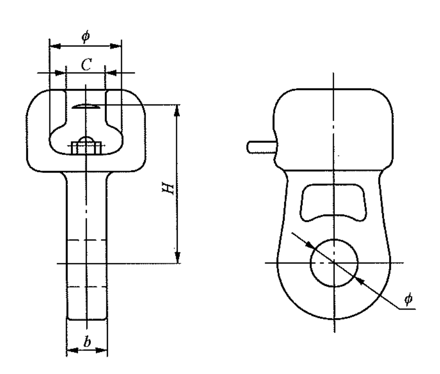


图 D-19　碗头挂板（W 型）

表 D-24　　碗 头 挂 板（W 型）

型号	主要尺寸（mm）					破坏荷重（kN）	质量（kg）	连接标记
	ϕ	C	h	d	b			
W-4	26.0	12.5	50	14	12	40	0.6	11
W-0732	34.5	19.2	70	20	32	70	1.1	16
W1-10	34.5	19.2	85	20	18	100	1.0	16
W1-12	34.5	19.2	85	20	26	120	1.1	16
W-30	51.0	27.5	110	39	32	300	4.2	24
W-7A	34.5	19.2	70	20	16	70	0.8	16
W-7B	34.5	19.2	115	20	16	70	0.9	16
W1-7G	34.5	19.2	70	20	25	70	1.1	16
W-32S	51.0	27.5	110	33	28	320	4.8	24
W-42130S1	59.0	32.0	130	39	32	420	5.4	28

D.4.7　碗头挂板（WS 型）

碗头挂板（WS 型）见图 D-20 和表 D-25。

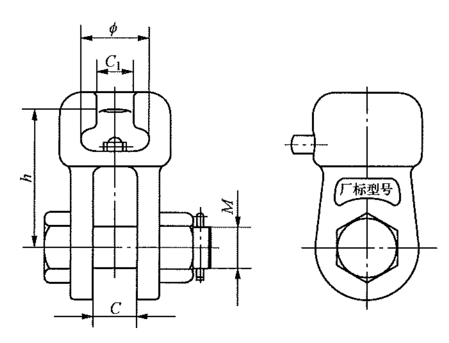


图 D-20　碗头挂板（WS 型）

表 D-25　　　碗头挂板（WS 型）

型号	主要尺寸（mm）					破坏荷重（kN）	质量（kg）	连接标记
	ϕ	C	C_1	M	h			
WS-7	34.5	18	19.2	16	70	70	1.0	16
WS-10	34.5	20	19.2	18	85	100	1.2	16
WS-12	34.5	24	19.2	22	85	120	1.8	16
WS-1611	42.5	26	23.0	24	110	160	3.8	20
WS-16	42.5	26	23.0	24	95	160	2.6	20
WS-21	51.0	30	27.5	27	100	210	4.3	24
WS-25	51.0	34	27.5	30	110	250	6.1	24
WS-30	51.0	38	27.5	36	110	300	5.7	24
WS-16D	42.5	26	23.0	24	95	160	2.1	20
WS-16G	42.5	32	23.0	30	95	160	3.6	20
WS-16110S	42.5	22	23.0	24	110	160	2.8	20
WS-16S	42.5	22	23.0	24	95	160	2.7	20
WS-16105S	42.5	22	23.0	24	105	160	2.8	20
WS-20D	51.0	30	27.5	27	100	210	4.3	24
W2-21D	42.5	30	23.0	27	100	210	4.5	20
WS-2110S	42.5	24	23.0	24	110	210	3.7	20
WS-21S	42.5	24	23.0	24	100	210	3.6	20
WS-25S	51.0	28	27.5	27	100	250	5.2	24
WS-30D	51.0	38	27.5	36	110	300	7.5	24
WS-32S	51.0	32	27.5	30	110	320	4.7	24
WS-32120S	51.0	32	27.5	30	120	320	4.8	24
WS-32210S	51.0	32	27.5	30	210	320	7.5	24
WS-42S	59.0	38	32.0	36	120	420	6.0	28
WS-42140S	59.0	38	32.0	36	140	420	6.5	28
WS-53S	67.5	42	36.0	42	140	530	10.3	32

D.4.8　碗头挂板（加长 WS 型）

碗头挂板（加长 WS 型）见图 D-21 和表 D-26。

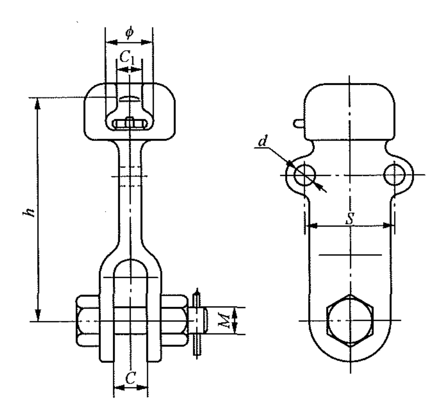


图 D-21 碗头挂板（加长 WS 型）

表 D-26 碗头挂板（加长 WS 型）

型号	主要尺寸（mm）							破坏荷重（kN）	质量（kg）	连接标记
	ϕ	h	C	C_1	M	S	d			
W-7AS	34.5	195	24	19.2	16	45	14	70	2.4	16
WS-10/120H	34.5	120	20	19.2	18	—	单 12.5	100	1.6	16
WS-16A	42.5	195	26	23.0	24	45	14	160	6.0	20
WS-16AH	42.5	150	22	23.0	24	40	14	160	3.4	20
WS-21A	42.5	195	30	23.0	27	45	13.5	210	6.7	20
WS-21B	42.5	195	30	23.0	27	45	14	210	6.7	20
WS-21AH	42.5	150	24	23.0	24	40	14	210	4.2	20
WS-21AS	42.5	200	24	23.0	24	80	18	210	4.7	20
WS-21AS1	42.5	200	30	23.0	27	80	18	210	4.9	20
WS-32AS	51.0	200	32	27.5	30	80	18	320	6.1	24

D.4.9 挂板（P 型）

挂板（P 型）见图 D-22 和表 D-27。

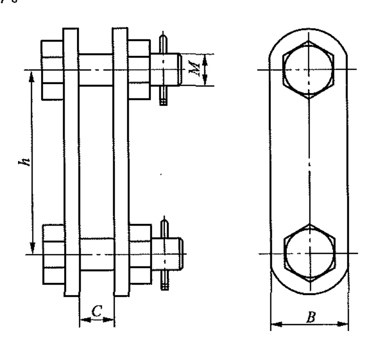


图 D-22 挂板（P 型）

表 D-27 挂 板 （P 型）

型号	主要尺寸（mm）				破坏荷重（kN）	质量（kg）
	C	M	h	B		
P-7	18	16	70	40	70	0.6
P-7/120	22	16	120	40	70	0.9

续表

型号	主要尺寸（mm）				破坏荷重（kN）	质量（kg）
	C	*M*	*h*	*B*		
P-10	20	18	80	45	100	0.9
P-1014	20	18	140	45	100	1.3
P-12	24	22	80	55	120	1.5
P-1212	22	22	120	60	120	2.6
P-16	26	24	90	60	160	2.4
P-1618	26	24	180	60	160	0.6
P-1626	26	24	260	60	160	4.5
P-1642	26	24	420	60	160	5.7
P-1612	26	24	120	60	160	2.3
P-21	30	27	120	70	210	4.1
P-2118	30	27	180	70	210	5.1
P-2124	30	27	240	70	210	6.0
P-2130	30	27	300	70	210	6.9
P-2136	30	27	360	70	210	7.8
P-2142	30	27	420	70	210	8.7
P-2148	30	27	480	70	210	9.7
P-2154	30	27	540	70	210	10.6
P-25	34	30	120	78	250	5.3
P-2515	34	30	150	78	250	5.9
P-2518	34	30	180	78	250	6.5
P-2524	34	30	240	78	250	7.7
P-2530	34	30	300	78	250	8.9
P-2536	34	30	360	78	250	9.2
P-2540	34	30	400	78	250	11.1
P-2542	34	30	420	78	250	10.3
P-2548	34	30	480	78	250	11.5
P-2554	34	30	540	78	250	12.7
P-2566	34	30	660	78	250	16.3
P-30	38	36	120	80	300	4.8
P-3018	38	36	180	80	300	5.4
P-3024	38	36	240	80	300	6.0
P-3030	38	36	300	80	300	6.6
P-3036	38	36	360	80	300	7.2
P-3042	38	36	420	80	300	7.8
P-3048	38	36	480	80	300	8.4
P-3054	38	36	540	80	300	9.0
P-5020	44	42	200	85	500	11.8
P-5026	44	42	260	85	500	12.6

续表

型号	主要尺寸（mm）				破坏荷重（kN）	质量（kg）
	C	M	h	B		
P-16S	22	24	90	62	160	2.4
P-2118S	24	24	180	62	210	3.3
P-2124S	24	24	240	62	210	3.9
P-21S	24	24	120	62	210	2.5
P-32120S	30	30	120	75	320	4.4
P-32S	32	30	180	78	320	5.9
P-3210S	32	30	100	78	320	4.5
P-3220S	32	30	200	78	320	6.2
P-32240S	32	30	240	75	320	7.0
P-3230S	32	30	300	78	320	7.9
P-3236S	32	30	360	78	320	8.9
P-3240S	32	30	400	78	320	9.6
P-32240S	32	30	240	75	320	7.0
P-32480S	32	30	480	78	320	10.3
P-32540S	32	30	540	78	320	11.3
P-42S	38	36	200	85	420	8.6
P-4215S	38	36	150	88	420	7.1
P-4223S	38	36	230	85	420	8.8
P-4226S	38	36	260	85	420	10.0
P-4229S	38	36	290	85	420	11.3
P-4232S	38	36	320	85	420	11.4
P-4256S	38	36	560	85	420	16.0
P-4247S	38	36	470	85	420	14.0
P-4238S	38	36	380	85	420	12.6
P-4244S	38	36	440	85	420	13.8
P-64200S	42	42	200	100	640	14.0
P-64230S	42	42	230	100	640	15.0
P-64240S	42	42	240	100	640	14.8
P-64260S	42	42	260	100	640	15.9
P-64290S	42	42	290	100	640	16.8
P-64320S	42	42	320	100	640	17.8
P-64350S	42	42	350	100	640	18.7
P-84135S	44	48	135	122	840	15.4
P-84180S	44	48	180	122	840	17.1
P-84200S	44	48	200	120	840	22.1
P-100200S	49	52	200	130	1000	23.8
P-120200S	52	56	200	140	1200	27.3
P-128180S	52	56	180	146	1280	27.1

D.4.10　挂板（PS 型）

挂板（PS 型）见图 D-23 和表 D-28。

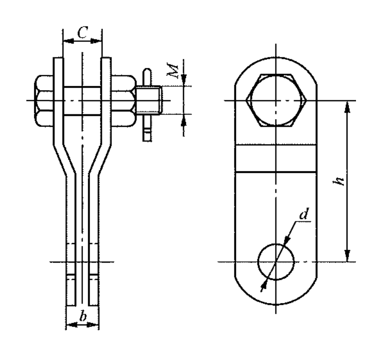


图 D-23　挂板（PS 型）

表 D-28　　挂　板　（PS　型）

型号	主要尺寸（mm）					破坏荷重（kN）	质量（kg）
	C	*b*	*M*	*d*	*h*		
PS-7	18	16	16	20	90	70	0.6
PS-10	20	16	18	20	90	100	0 8
PS-12	24	20	22	24	95	120	1.7
PS-16	26	24	24	26	210	160	3.2
PS-21	30	28	27	30	140	210	4.0
PS-30	38	32	36	39	150	300	5.9
PS-40	44	40	42	45	150	400	5.9
PS-16S	22	20	24	26	90	160	1.7
PS-21S	26	22	24	26	200	210	2.8
PS-21100S	24	20	24	26	100	210	2.1
PS-32S	32	28	30	33	140	320	4.2
PS-42S	36	34	36	39	150	420	6.2
PS-42210S	38	32	36	39	210	420	7.3
PS-42290S	38	32	36	39	290	420	9.0
PS-50S	38	36	36	39	150	500	7.5
PS-64210S	40	36	42	45	210	640	11.2

D.4.11　挂板（PD 型）

挂板（PD 型）见图 D-24 和表 D-29。

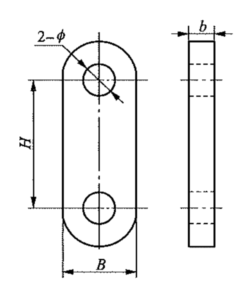


图 D-24　挂板（PD 型）

表 D-29　　挂　板（PD　型）

型号	主要尺寸（mm）			破坏荷重（kN）	质量（kg）
	ϕ	H	b		
PD-0770	18	70	16	70	0.5
PD-1080	20	80	16	100	0.7
PD-12100	24	100	16	120	1.0

D.4.12　耳轴挂板（GD 型）

耳轴挂板（GD 型）见图 D-25 和表 D-30。

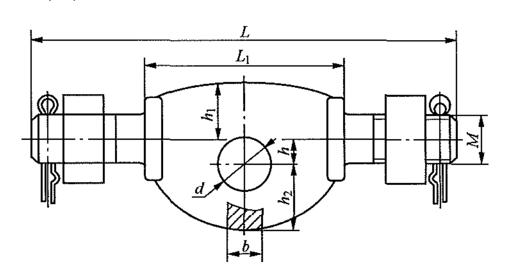


图 D-25　耳轴挂板（GD 型）

表 D-30　　耳 轴 挂 板（GD 型）

型号	主要尺寸（mm）								破坏荷重（kN）	质量（kg）
	L	L_1	d	M	h	b	h_1	h_2		
GD-12	212	112	24	22	12	22	32	33	120	1.5
GD-25	246	126	33	30	12	30	40	40	250	3.7
GD-30	264	112	32	30	12	30	35	38	300	2.9
GD-50	280	112	39	36	12	34	40	48	500	4.4
GD-60	286	112	45	42	16	40	50	55	600	6.0
GD-12S	200	112	24	22	12	16	35	40	120	1.7
GD-16S	240	112	26	24	12	18	35	40	160	2.0
GD-16S1	264	112	26	30	12	18	35	40	160	2.0
GD-21A	232	112	26	24	12	24	36	38	210	2.0
GD-21S	230	112	26	24	12	20	35	40	210	1.7
GD-32A	306	154	30	30	12	26	42	42	320	3.6
GD-32S/21	240	112	26	30	12	20	30	32	320/210	3.6
GD-32S	240	112	33	30	12	28	35	40	320	3.6
GD-42S	278	130	39	36	12	32	35	45	420	4.2
GD-42/32S	290	130	33	36	12	28	35	45	420/320	4.4
GD-50S	278	130	39	36	12	32	50	48	500	4.4
GD-50S/42	280	130	39	36	65	32	50	48	500/420	6.7
GD-64S1	300	136	45	42	12	36	50	55	640	6.5
GD-70S	328	136	45	42	12	36	55	60	700	7.3
GD-84S	376	170	51	48	20	36	70	62	840	11.1
GD-84/64S	376	170	45	48	16	36	60	62	840/640	10.5
GD-100/84S	380	170	51	52	20	36	70	66	1000/840	12.0

D.4.13　耳轴挂板（EB、LT 型）

耳轴挂板（EB、LT 型）见图 D-26 和表 D-31。

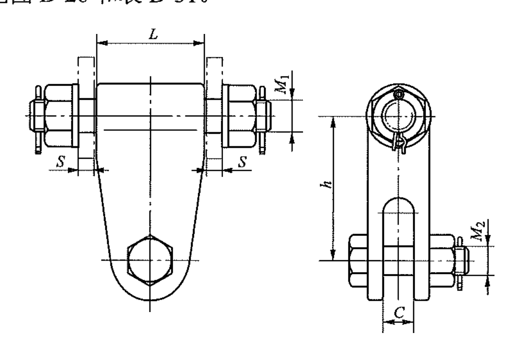


图 D-26　耳轴挂板（EB、LT 型）

表 D-31　　耳轴挂板（EB、LT 型）

型号	主要尺寸（mm）						破坏荷重（kN）	质量（kg）
	b	*d*	*h*	*M*	*L*	*S*		
LT-10	16	20	100	24	80	10	100	1.9
EB-12	18	17.5	80	20	70	15	120	1.9
EB-16	22	21.5	80	22	100	20	160	3.1
LT-16	18	26	100	24	80	20	160	3.5
LT-32S/16	16	26	100	30	80	15	160	3.5
LT-16S	16	24	100	24	80	10	160	2.5
LT-21S	20	26	100	24	80	16	210	3.3
LT-21	26	30	100	27	80	22	210	4.9
LT-25S	20	26	100	27	80	12	250	4.0
LT-30	32	39	100	36	80	12	300	6.8
LT-32S	26	30	100	30	80	15	320	4.2
LT-32S/32	28	33	100	30	80	15	320	4.2
EB-32S	28	33	100	30	112	24	320	5.7
LT-42S	30	33	100	36	80	16	420	5.9
LT-42S/42	32	39	100	36	86	16	420	5.9
EB-50S	32	39	125	36	132	30	500	9.1
EB-64S	34	39	125	42	116	20	640	10.4
EB-70	38	45	125	42	136	26	700	14.4
EB-70A	38	45	150	64	195	30	700	29.9
EB-70B	42	51	150	64	195	30	700	31.0
EB-70C	38	45	125	42	116	28	700	14.2
EB-84S	36	45	180	48	136	18	840	17.9
EB-84S1	36	51	180	48	134	22	840	17.9
EB-100S	36	51	170	52	190	22	1000	25.7
EB-130S	46	59	200	64	120	20-30	1300	27.5

D.4.14　挂板（ZBS 型）

挂板（ZBS 型）见图 D-27 和表 D-32。

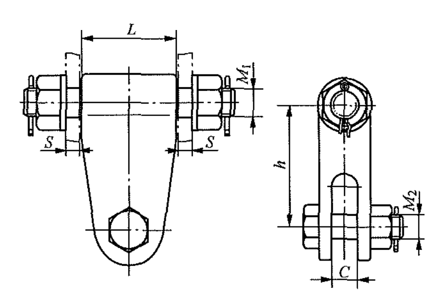


图 D-27　挂板（ZBS 型）

表 D-32　　挂　板　（ZBS 型）

型号	主要尺寸（mm）						破坏荷重（kN）	质量（kg）
	C	M_1	M_2	S	h	L		
ZBS-20	26	24	24		100	60	200	4.6
ZBS-21S	22	24	24	15	100	64	210	3.6
ZBS-32S/16	22	30	24	20	120	60	320/160	5.6
ZBS-32S/21	24	30	24	20	120	60	320/210	5.6
ZBS-32S	32	30	30	20	140	60	320	6.5
ZBS-32/16	26	36	24	20	140	60	320/160	8.4
ZBS-32/21	30	36	27	16	140	60	320/210	8.6
ZBS-32/16S	22	36	24	18	140	60	320/160	7.3
ZBS-32/21S	24	36	24	18	140	60	320/210	7.3
ZBS-32/32S	32	36	30	16	140	60	320/320	7.8
ZBS-42S	36	36	36	20	140	60	420	9.1
ZBS-64S	38	42	36	20	180	136	640	19.0
ZBS-64S/42S	38	42	36	20	150	70	640/420	10.7
ZBS-64S/32	32	42	30	20	160	64	640/320	10.6
ZBS-84S	42	48	42	20	180	124	840	21.7
ZBS-100/84S	44	52	48	32	180	124	100/840	27.0

D.4.15　U 型挂环

U 型挂环见图 D-28 和表 D-33。

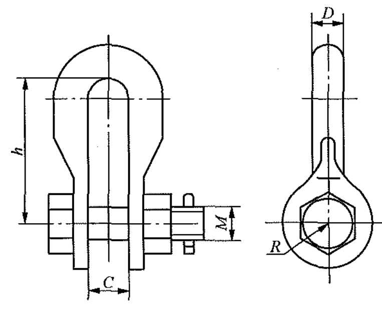


图 D-28　U 型挂环

表 D-33　　U 型挂环

型号	主要尺寸（mm）					破坏荷重（kN）	质量（kg）
	C	*M*	*D*	*h*	*R*		
U-7	20	16	16	80	22	70	0.5
U-10	22	18	18	85	24	100	0.6
U-12	24	22	20	90	30	120	1.0
U-16	26	24	22	95	32	160	1.5
U-21	30	27	24	100	36	200	2.3
U-25	34	30	26	110	40	250	2.8
U-30	38	36	30	130	46	300	3.7
U-40	42	42	36	150	55	400	6.4
U-50	44	42	36	150	55	500	7.0
U-70	40	42	36	170	55	700	9.5
U-100	44	48	42	200	65	1000	14.5
U-10ST	26	18	18	70	24	100	0.7
U-12S	22	22	18	70	30	120	1.0
U-1610	28	24	22	100	32	160	1.6
U-16T	28	24	22	90	32	160	1.5
U-21150S	26	24	20	150	32	210	1.7
U-21S	26	24	20	100	32	210	1.4
U-21ST	30	24	20	100	32	210	2.0
U-25ST	34	27	24	110	36	250	2.6
U-25S	30	27	24	110	36	250	2.1
U-32ST	36	30	28	115	40	320	3.1
U-32140S	32	30	28	140	40	320	3.3
U-42150S	38	36	32	150	45	420	4.8
U-50G	38	36	32	170	43	500	7.0
U-50S	40	36	32	150	48	500	4.9
U-60G	46	42	38	172	44	600	7.6
U-64200S	42	42	36	200	55	640	7.0
U-64185S	42	42	36	185	55	640	6.6
U-84200S	44	48	40	200	62	840	10.3
U-120S	52	56	50	250	74	1200	19.9
U-120200S	52	56	50	200	74	1200	18.0

D.4.16　U 型螺丝

U 型螺丝见图 D-29 和表 D-34。

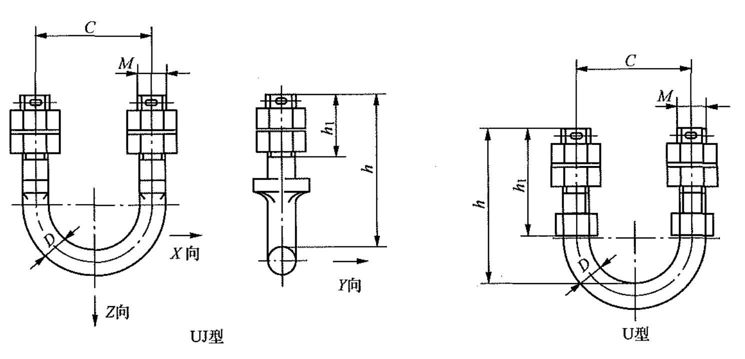


图 D-29 U 型螺丝

表 D-34 U 型 螺 丝

型号	主要尺寸（mm）					质量（kg）
	C	M	D	h	h_1	
U-1880	80	18	18	90	60	0.8
U-2080	80	20	20	100	70	1.1
U-2280	80	22	22	118	90	1.3
UJ-1880	80	18	18	105	50	0.9
UJ-2080	80	20	20	120	60	1.1
UJ-2280	80	22	22	126	65	1.4
UJ-1660	60	16	16	100	50	0.6
U-1660	60	16	16	90	60	0.6
U-1670	70	16	16	140	70	0.8
U-1680	80	16	16	122	80	0.6
U-1870	70	18	18	122	85	0.9
U-1880.1	80	18	18	122	80	0.9
U-2062	62	20	20	180	130	1.3
U-2070	70	20	20	125	95	1.1
U-2080.1	80	20	20	130	90	1.1
U-2080.2	80	20	20	140	100	1.2
U-2090	90	20	20	145	90	1.4
U-20100	100	20	20	130	85	1.3
U-2280.1	80	22	22	138	95	1.4
UJ-2280.1	80	22	22	146	85	1.2
U-2280.2	80	22	22	148	119	1.4
U-2280.3	80	22	22	159	120	1.7
UJ-2480	80	24	24	132	78	1.6
U-2490	90	24	24	145	90	1.4
UJ-2880	80	27	28	126	65	2.3
UJ-30100	100	30	30	145	82	3.1

D.4.17 挂板（UB 型）

挂板（UB 型）见图 D-30 和表 D-35。

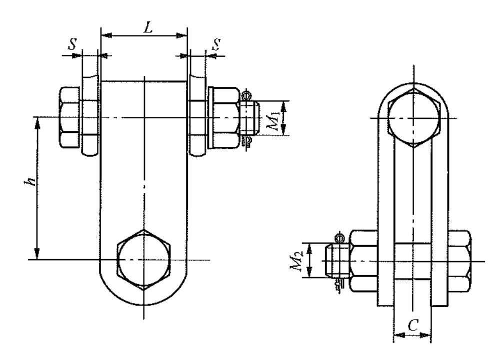


图 D-30 挂板（UB 型）

表 D-35

挂 板 （UB 型）

型号	主要尺寸（mm）						破坏荷重（kN）	质量（kg）
	C	M_1	M_2	L	S	h		
UB-4	20		16	24		70	40	0.5
UB-7	18	16	16	45	12	70	70	0.8
UB-7/90	18	16	16	50	12	90	70	1.0
UB-9-2	26	24	16	56	20	70	90	2.0
UB-10	20	18	18	45	12	80	100	1.0
UB-12	24	22	22	60	10	100	120	2.8
UB-16	26	24	24	60	12	100	160	2.9
UB-21	30	27	27	72	14	120	200	4.6
UB-25	32	30	30	62	17	120	250	5.3
UB-10D	22	18	18	45	25	80	100	2.5
UB-10A	22	18	18	45	10	80	100	1.1
UB-16S	22	24	24	60	15	90	160	3.5
UB-16140S	22	24	24	60	15	140	160	3.5
UB-21B	26	24	24	60	17	120	210	4.0
UB-25S1	22	27	24	70	20	120	250	4.4
UB-30	35	36	36	80	20	120	300	8.5
UB-32S	32	30	30	80	20	130	320	6.4
UB-50S	40	36	36	96	25	150	500	10.3

D.4.18 挂板（Z 型）

挂板（Z 型）见图 D-31 和表 D-36。

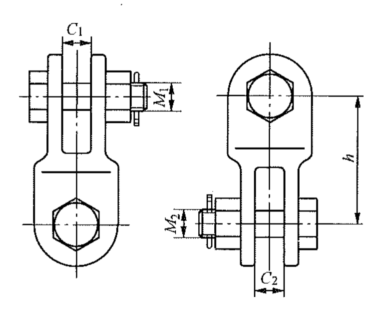


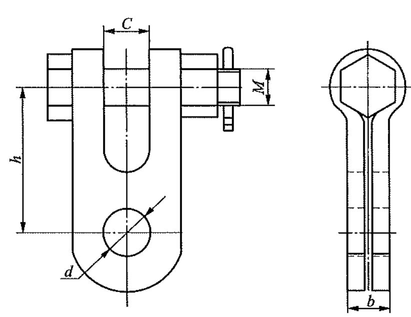
图 D-31 挂板（Z 型）

表 D-36 挂 板 （Z 型）

型号	主要尺寸（mm）					破坏荷重（kN）	质量（kg）
	C_1	C_2	M_1	M_2	h		
Z-21S1	24	24	24	24	90	210	1.4
Z1-25	34	34	30	30	110	250	3.8
Z-25B	44	35	42	36	150	250	9.7
Z-32S	32	32	30	30	136	320	5.8
Z-32S1	32	32	30	30	100	320	5.0
Z-42S	38	38	36	36	150	420	8.4
Z-42240S	38	38	36	36	240	420	10.6
Z-50S	38	38	36	36	150	500	14.2
Z-50	44	44	42	42	150	500	14.7
Z-60	50	50	48	48	180	600	19.0
Z-64S	42	42	42	42	180	640	19.4
Z-64S1	42	42	42	42	150	640	14.4
Z-84S	44	44	48	48	180	840	19.8
Z-84200S1	44	44	48	48	200	840	23.2
Z-100S1	48	48	52	52	220	1000	32.0
Z-120SA	52	52	56	56	190	1200	34.0
Z-130S	52	52	56	56	280	1300	39.1

D.4.19 挂板（ZS 型）

挂板（ZS 型）见图 D-32 和表 D-37。



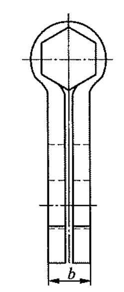


图 D-32 挂板（ZS 型）

表 D-37 挂 板 （ZS 型）

型号	主要尺寸（mm）					破坏荷重（kN）	质量（kg）
	C	b	M	d	h		
ZS-7	18	16	16	20	80	70	0.6
ZS-10	20	18	18	20	80	100	0.9
ZS-12	22	22	22	24	80	120	1.0
ZS-16	26	24	24	26	90	160	1.9
ZS-21	30	26	27	30	120	210	2.5

续表

型号	主要尺寸（mm）					破坏荷重（kN）	质量（kg）
	C	*b*	*M*	*d*	*h*		
ZS-30	38	34	36	39	150	300	5.4
ZS-16S	22	18	24	26	90	160	1.9
ZS-21S	25	22	24	26	100	210	1.6
ZS-25S	28	26	27	30	150	250	3.0

D.4.20　挂板（ZBD 型）

挂板（ZBD 型）见图 D-33 和表 D-38。

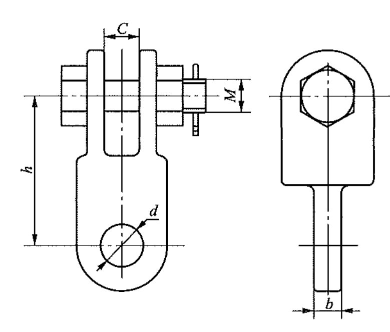


图 D-33　挂板（ZBD 型）

表 D-38　　挂　板　（ZBD　型）

型号	主要尺寸（mm）					破坏荷重（kN）	质量（kg）
	C	*b*	*M*	*d*	*h*		
ZBD-12S	20	16	22	24	100	120	1.5
ZBD-16	26	18	24	26	90	160	1.8
ZBD-32	38	34	36	38	136	320	6.3
ZBD-32120S	32	28	30	33	120	320	4.0
ZBD-32S	32	28	30	33	136	320	5.0
ZBD-42S	38	32	36	39	145	420	7.1
ZBD-42150S	38	32	36	39	150	420	6.7
ZBD-50	44	40	42	44	150	500	10.1
ZBD-50S	38	32	36	39	220	500	9.6
ZBD-50150S1	38	32	36	39	150	500	8.8
ZBD-60	50	42	48	51	150	600	11.5
ZBD-64S	42	36	42	45	150	640	8.6
ZBD-84S	44	36	48	51	180	840	15.1
ZBD-84200S1	44	36	48	51	200	840	16.8

D.4.21　延长环（PH 型）

延长环（PH 型）见图 D-34 和表 D-39。

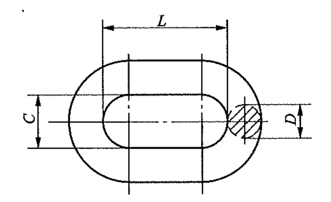


图 D-34 延长环（PH 型）

表 D-39 延 长 环（PH 型）

型号	主要尺寸（mm）			破坏荷重（kN）	质量（kg）
	C	D	L		
PH-7	20	16	80	70	0.4
PH-10	22	18	100	100	0.7
PH-12	24	20	120	120	0.9
PH-16	26	22	140	160	1.2
PH-21	30	24	160	210	1.7
PH-25	34	26	160	250	2.0
PH-30	38	30	180	300	3.0
PH-12S	22	18	170	120	2.5
PH-16S	26	20	120	160	0.9
PH-1614S	26	20	140	160	1.0
PH-21S	26	20	130	210	0.9
PH-25S	32	24	120	250	1.3
PH-32S	34	28	140	320	2.0
PH-32130S	34	28	130	320	1.9
PH-40G	44	36	185	400	4.3
PH-42S	40	32	160	420	3.0
PH-50400S	36	32	400	500	6.0

D.4.22 直角挂环（ZH 型）

直角挂环（ZH 型）见图 D-35 和表 D-40。

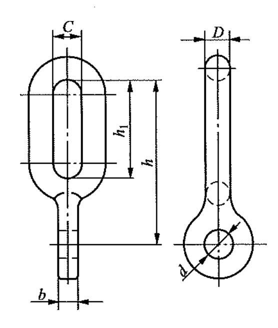


图 D-35 直角挂环（ZH 型）

表 D-40　　直角挂环（ZH 型）

型号	主要尺寸（mm）						破坏荷重（kN）	质量（kg）
	D	b	C	d	h_1	h		
ZH-7	16	16	24	20	57	100	70	0.9
ZH-7P	16	16	24	20	57	95	70	0.4
ZH-10	18	16	22	20	66	100	100	1.1
ZH-12	18	16	22	24	65	115	120	1.1
ZH-16	22	18	26	26	75	135	160	1.2
ZH-16/153	22	18	26	26	90	153	160	1.4
ZH-21	24	26	32	30	75	150	210	2.3

D.4.23　牵引板（QY 型）

牵引板（QY 型）见图 D-36 和表 D-41。

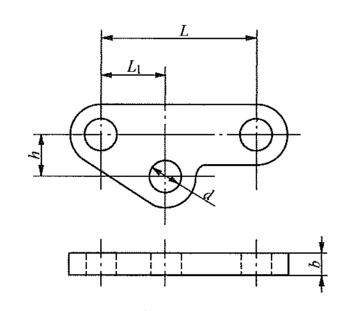


图 D-36　牵引板（QY 型）

表 D-41　　牵引板（QY 型）

型号	主要尺寸（mm）					破坏荷重（kN）	质量（kg）
	L	L_1	b	d	h		
QY-7	100	38	16	18	22	70	0.8
QY-10	120	42	16	20	25	100	1.0
QY-12	150	52	16	24	30	120	1.5
QY-16	180	55	18	26	35	160	2.1
QY-21	200	75	26	30	45	210	4.0
QY-25	220	85	30	33	50	250	6.2
QY-30	240	95	32	39	57	300	7.3
QY-50	260	100	38	45	70	500	12.7
QY-60	260	114	42	51	80	600	16.0
QY-21S	200	75	20	26	45	210	2.8
QY-32S	240	95	28	33	57	320	5.9
QY-32260S	260	95	28	33	57	320	7.5
QY-42S	260	100	32	39	70	420	8.4
QY-64S	260	114	36	45	80	640	12.5
QY-84260S	260	120	36	51	90	840	14.3
QY-120S	300	150	44	60	150	1200	27.8

D.4.24 延长拉杆（YL 型）

延长拉杆（YL 型）见图 D-37 和表 D-42。

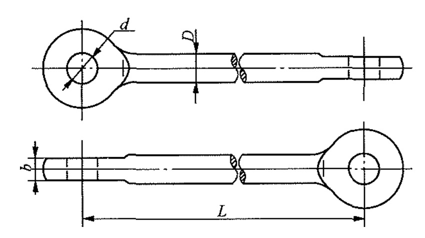


图 D-37 延长拉杆（YL 型）

表 D-42 延 长 拉 杆（YL 型）

型号	主要尺寸（mm）				破坏荷重（kN）	质量（kg）
	D	d	b	L		
YL-0712	18	18	16	120	70	0.4
YL-0930	18	20	16	300	90	0.8
YL-1012	18	20	16	120	100	0.8
YL-1040	18	20	16	400	100	1.1
YL-1043	22	20	16	430	100	1.5
YL-1050	18	20	16	500	100	1.4
YL-1243	22	24	18	430	120	1.8
YL-1250	22	24	18	500	120	1.9
YL-1623	22	26	18	230	160	1.0
YL-1640	22	26	18	400	160	1.6
YL-2043	24	28.5	20	430	200	3.0
YL-2050	30	30	24	500	200	3.7
YL-2155	26	30	20	550	210	3.1
YL-2527	30	33	30	270	250	3.0
YL-3043	36	39	32	430	300	5.6
YL-1650S	22	26	18	500	160	2.1
YL-2140S	24	26	20	400	210	1.8
YL-2155S	24	26	20	550	210	2.2
YL-2165S	24	26	20	650	210	5.0
YL-3236S	30	33	28	360	320	3.4
YL-3240S	30	33	28	400	320	3.7
YL-3250S	30	33	28	500	320	4.2
YL-42430S	36	39	32	430	420	5.0
YL-50350S	40	39	32	350	500	5.5
YL-6455S	42	45	36	550	640	9.3
YL-84295S	50	51	36	295	840	8.4

D.4.25 支撑架（ZCJ 型）

支撑架（ZCJ 型）见图 D-38 和表 D-43。

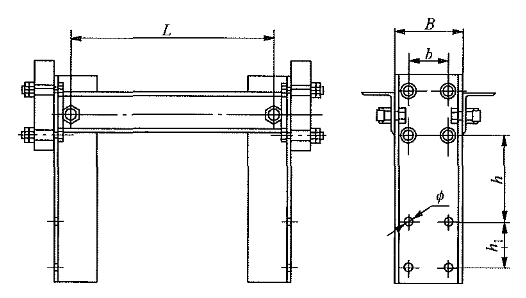


图 D-38　支撑架（ZCJ 型）

表 D-43　　支撑架（ZCJ 型）

型号	主要尺寸（mm）						质量（kg）
	ϕ	B	b	h_1	h	L	
ZCJ-40	18	120	60	60	100	322	12.7
ZCJ-45	18	120	60	60	100	370	10.5
ZCJ-45H	18	120	60	60	245	358	13.2
ZCJ-45L	18	126	60	60	140	370	15.8
ZCJJ-450	26	160	80	80	150	486	30.8
ZCJJ-50	26	160	80	80	150	478	24.7
ZCJ-60S	18	120	60	60	100	520	14.3
ZCJ-42S	18	120	60	60	140	358	14.1
ZCJ-50S	18	120	60	60	100	420	13.5

D.4.26　调整板（DB 型）

调整板（DB 型）见图 D-39 和表 D-44。

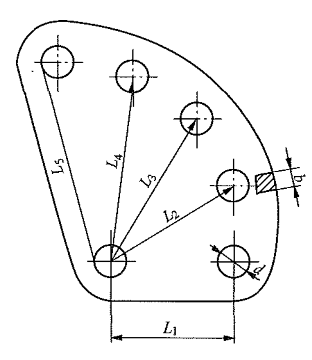


图 D-39　调整板（DB 型）

表 D-44　　调整板（DB 型）

型号	主要尺寸（mm）							破坏荷重（kN）	质量（kg）
	d	b	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5		
DB-7	18	16	70	95	120	145	170	70	1.7
DB-10	20	16	80	110	140	170	200	100	2.7
DB-12	24	16	100	135	170	205	240	120	4.0
DB-16	26	18	110	125	140	155	170	160	4.1

续表

型号	主要尺寸（mm）							破坏荷重（kN）	质量（kg）
	d	b	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5		
DB-21	30	26	120	135	150	165	180	210	7.4
DB-25	33	30	120	140	160	180	200	250	11.8
DB-30	39	32	120	140	160	180	200	300	12.5
DB-40	45	38	140	170	200	230	260	400	22.1
DB-60	51	42	135	160	185	210	235	600	31.6
DB-16S	26	18	110	125	140	155	170	160	4.1
DB-21S	26	20	120	135	150	165	210	210	6.8
DB-25S	30	24	120	135	150	165	180	250	7.0
DB-32S	33	28	120	140	160	180	200	320	11.9
DB-42S	39	32	140	185	230	275	320	420	16.5
DB-42180S	39	32	100	140	180	220	260	420	13.8
DB-50S	39	32	140	185	230	275	320	500	17.0
DB-64185S	45	36	135	160	185	210	235	640	19.4
DB-64230S	45	36	140	185	230	275	320	640	21.0
DB-84S	51	36	140	170	200	230	260	840	24.8
DB-120S	60	44	170	200	240	280	320	1200	40.0

D.4.27　PT 调整板

PT 调整板见图 D-40 和表 D-45。

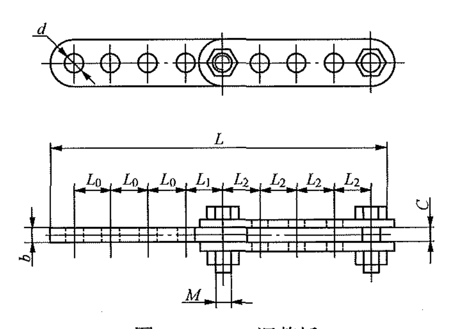


图 D-40　PT 调整板

表 D-45　　　　PT　调　整　板

型号	主要尺寸（mm）								破坏荷重（kN）	质量（kg）
	L_0	L_1	L_2	M	d	b	C	L		
PT-7	45	30	45	16	18	16	18	225～345	70	2.0
PT-10	50	40	50	18	20	16	20	250～390	100	3.0
PT-12	60	45	60	22	24	16	24	300～465	120	5.3
PT-16	65	50	45	24	26	18	26	325～505	160	7.0
PT-20	70	60	70	27	30	26	30	410～550	210	10.1
PT-2163	85	70	70	24	26	20	24	400～630	210	7.5

续表

型号	主要尺寸（mm）								破坏荷重（kN）	质量（kg）
	L_0	L_1	L_2	M	d	b	C	L		
PT-30	80	70	80	36	39	32	38	470～630	300	140
PT-25	90	90	80	30	33	30	34	410～590	250	14.9
PT-50	80	160	100	42	45	38	40	740～1280	500	50.0
PT-60	90	180	100	48	51	42	44	820～1390	600	66.0
PT-21450S	70	70	85	24	26	20	24	295～450	210	6.2
PT-32S	80	70	60	30	33	28	32	350～500	320	13.3
PT-42S	80	70	80	36	39	32	36	625～945	420	28.0
PT-64S	90	155	100	42	45	36	42	820～1390	640	49.7
PT-84S	90	155	100	48	51	36	44	820～1390	840	57.6

D.4.28 联板（L 型）

联板（L 型）见图 D-41 和表 D-46。

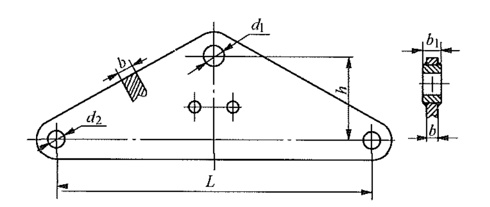


图 D-41 联板（L 型）

表 D-46 联 板（L 型）

型号	主要尺寸（mm）						破坏荷重（kN）	质量（kg）
	b_1	b	h	d_1	d_2	L		
L-1650	—	18	120	30	26	500	160	6.5
L-1650S1	18	18	130	26	20	500	160	8.8
L-1660	—	18	200	30	20	600	160	11.3
L-2045	26	16	110	30	20	450	200	7.0
L-2050	26	18	200	30	26	500	200	11.4
L-2070	26	18	300	30	20	700	200	18.2
L-2140	26	16	100	30	20	400	210	7.0
L-2160	26	16	150	30	20	600	210	10.2
L-2165S	20	18	170	26	20	650	210	13.3
L-2150	26	16	130	30	20	500	210	8.0
L-2155S	20	16	250	26	20	550	210	13.0
L-2540	30	16	110	33	24	400	250	9.0
L-2540S	24	18	110	30	26	400	250	7.6
L-3040	32	18	110	39	26	400	300	10.0

续表

型号	主要尺寸（mm）						破坏荷重（kN）	质量（kg）
	b_1	b	h	d_1	d_2	L		
L-3050T	32	22	130	39	26	500	300	15.1
L-3055	32	18	200	39	26	550	300	15.5
L-3075	32	22	250	39	26	750	300	27.8
L-3080	32	30	300	39	33	800	300	36.6
L-3240S	28	18	110	33	26	400	320	7.6
L-3255S	28	18	200	33	26	550	320	13.9
L-3270S	18	28	200	33	26	700	320	17.6
L-4040	38	26	175	45	30	400	400	15.9
L-4070	38	30	180	45	33	700	400	31.7
L-4080	38	26	250	45	30	800	400	28.0
L-4270S	32	20	200	39	26	700	420	19.8
L-4255S	32	20	140	39	26	550	420	19.1
L-4545S	34	22	250	39	30	457	450	16.9
L-5045/150	40	32	150	45	39	450	500	21.3
L-5050-150	40	32	150	45	39	500	500	25.9
L-5050/170	38	30	170	45	33	500	500	22.6
L-5060	38	32	250	45	39	600	500	35.8
L-6045	42	32	200	51	39	450	600	39.9
L-6070	42	32	250	51	39	700	600	42.9
L-6050	42	30	250	51	39	500	600	29.8
L-12060S	44	36	250	60	45	600	1200	56.4

D.4.29 联板（LF 型）

联板（LF 型）见图 D-42 和表 D-47。

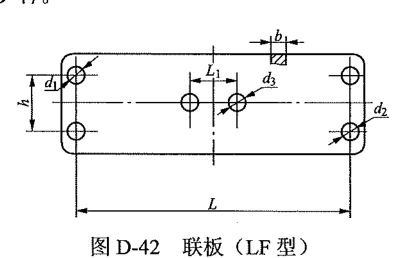


图 D-42 联板（LF 型）

表 D-47 联 板 （LF 型）

型号	主要尺寸（mm）							破坏荷重（kg）	质量（kg）
	b	h	d_1	d_2	L	d_3	L_1		
LF-2045	16	110	20	20	450	18	60	200	9.5
LF-2040	16	70	20	20	400	14	60	200	5.5
LF-2150	16	110	20	20	500	—	—	200	10.6

续表

型号	主要尺寸（mm）							破坏荷重（kg）	质量（kg）
	b	h	d_1	d_2	L	d_3	L_1		
LF-2540	16	110	24	24	400	—	—	250	9.2
LF-2545	16	110	24	24	450	18	60	250	10.4
LF-3040	18	120	26	26	400	—	—	300	11.2
LF-3045	18	100	26	26	450	18	60	300	12.5
LF-3050	18	70	26	26	500	—	—	300	10.3
LF-4040	26	120	30	30	400	—	—	400	14.8
LF-4050	26	250	30	30	500	18	80	400	38.1
LF-4260S	20	250	26	26	600	18	60	420	32.5
LF-4245	26	120	30	30	450	—	—	420	20.3
LF-4260	20	190	24	24	600	18	80	420	27.5
LF-6460S	28	250	33	33	600	18	60	640	48.0

D.4.30　联板（LS 型）

联板（LS 型）见图 D-43 和表 D-48。

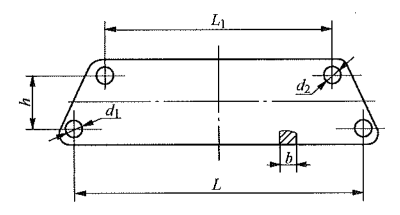


图 D-43　联板（LS 型）

表 D-48　　**联　板　（LS　型）**

型号	主要尺寸（mm）						破坏荷重（kN）	质量（kg）
	b	h	d_1	d_2	L	L_1		
LS-1212	16	65	18	20	400	120	120	5.0
LS-1221	16	65	18	20	400	210	120	5.4
LS-1225	16	65	18	20	400	250	120	5.5
LS-1229	16	65	18	20	400	290	120	5.7
LS-1233	16	65	18	20	400	330	120	5.9
LS-1237	16	65	18	20	400	370	120	6.1
LS-1255	16	65	18	20	400	550	120	8.7
LS-1633	18	65	20	20	400	330	160	7.5
LS-214020	16	120	20	20	400	200	200	7.4

续表

型号	主要尺寸（mm）						破坏荷重（kN）	质量（kg）
	b	h	d_1	d_2	L	L_1		
LS-214080	16	130	20	20	800	400	210	19.2
LS-3020	18	65	26	26	400	200	300	7.0
LS-302040	22	65	26	26	400	200	300	8.4
LS-304050	18	120	26	26	500	400	300	13.0
LS-304540	18	120	26	26	450	400	300	12.3
LS-305045	18	130	26	26	500	450	300	14.4
LS-324037S	18	120	26	26	400	370	320	11.3
LS-645045S	28	130	33	33	450	500	640	24.7
LS-646080S	28	180	33	33	800	600	640	43.9
LS-846040S	32	100	39	39	600	400	840	28.6
LS-200540S	40	200	55	55	540	540	2000	62.8

D.4.31　联板（LK 型）

联板（LK 型）见图 D-44 和表 D-49。

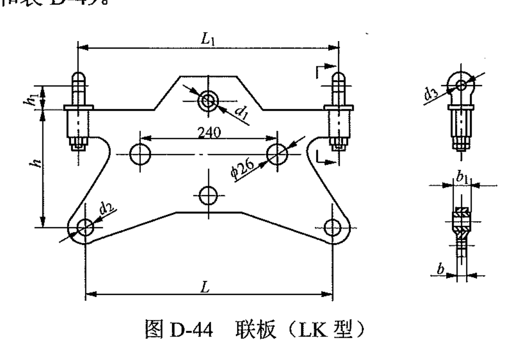


图 D-44　联板（LK 型）

表 D-49　　联　板　（LK　型）

型号	主要尺寸（mm）									破坏荷重（kN）	质量（kg）
	b_1	b	h	h_1	L	L_1	d_1	d_2	d_3		
LK-0745	16	16	225	40	450	450	18	18	18	70	17.3
LK-0750	16	16	265	40	500	500	18	18	18	70	17.6
LK-1045	16	16	230	40	450	450	20	18	18	100	16.0
LK-1050	16	16	265	40	500	500	20	18	18	100	17.6
LK-1645	18	18	230	40	450	450	26	18	18	160	17.0
LK-164745	18	18	225	40	450	470	26	18	18	160	15.4
LK-164945	18	18	230	40	450	490	26	18	18	160	16.9
LK-165550S	18	18	265	40	500	550	26	18	18	160	19.8
LK-1645S	18	18	230	40	450	450	26	18	18	160	16.6
LK-1650S	18	18	265	40	500	500	26	18	18	160	20.4
LK-205045	26	18	230	40	450	500	30	18	18	200	15.6

续表

型号	主要尺寸（mm）									破坏荷重（kN）	质量（kg）
	b_1	b	h	h_1	L	L_1	d_1	d_2	d_3		
LK-2145S	20	18	195	40	450	450	26	18	18	210	12.1
LK-21550S	20	18	265	40	500	550	26	18	18	210	20.5
LK-214745	20	18	195	40	450	470	26	18	18	210	15.3
LK-214945	26	18	230	40	450	490	30	18	18	210	18.3
LK-214945S	18	18	225	45	450	490	26	18	18	210	16.0
LK-215045	20	18	230	40	500	500	26	18	18	210	18.3
LK-255550S	24	18	265	40	500	550	30	20	18	250	21.3
LK-3250S	28	18	265	40	500	500	33	18	18	320	21.6

D.4.32　联板（LX 型）

联板（LX 型）见图 D-45 和表 D-50。

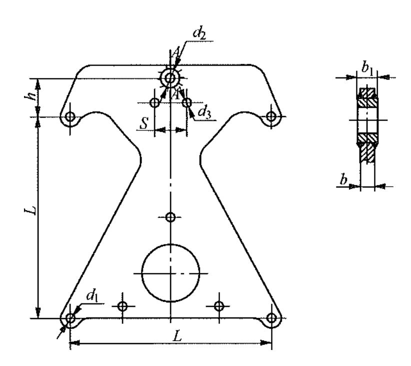


图 D-45　联板（LX 型）

表 D-50　　　　　　　　　**联　板　（LX　型）**

型号	主要尺寸（mm）								破坏荷重（kN）	质量（kg）
	L	h	d_1	d_2	d_3	b_1	b	S		
LX-1645	450	95	20	26	18	18	18	80	160	26.0
LX-2145	450	95	18	30	—	26	18		210	25.1
LX-2145S	450	95	18	26	18	20	16	80	210	21.3
LX-2150S	500	95	18	26	18	20	16	80	210	25.5
LX-2545	450	95	20	33	18	30	18	80	250	25.5
LX-2545A	450	95	20	33	18	26	18	80	250	25.5
LX-3045	450	95	24	39	14	32	18	80	300	27.1
LX-3245	450	95	20	39	—	32	18	—	320	27.4
LX-3250S	500	95	18	33	18	28	18	80	320	28.5
LX-4245	450	100	22	39	18	22	22	60	420	35.4
LX-4245S	450	100	20	39	18	32	18	80	420	23.9
LX-4250S	500	95	20	39	18	32	18	80	420	29.0
LX-6450S	500	95	20	45	18	36	18	80	640	30.5
LX-8450S	500	120	26	51	—	36	20	—	840	37.8

D.4.33　联板（LXV 型）

联板（LXV 型）见图 D-46 和表 D-51。

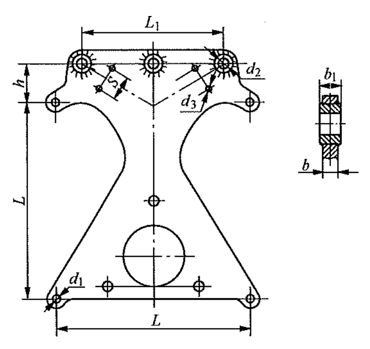


图 D-46　联板（LXV 型）

表 D-51　　联　板　（LXV　型）

型号	主要尺寸（mm）									破坏荷重（kN）	质量（kg）
	L	L_1	h	b	b_1	S	d_1	d_2	d_3		
LXV-1645	450	380	110	18	18	80	20	26	18	160	19.5
LXV-2045	450	380	95	18	26	—	20	30	—	200	24.2
LXV-2145	450	380	110	18	27	80	20	30	18	210	25.1
LXV-2150S	500	500	100	18	20	—	20	26	—	210	29.4
LXV-2145	450	380	100	26	18	—	18	—	—	210	25.1
LXV-2545	450	380	110	18	26	80	20	30	18	250	20.0
LXV-3045A	450	380	110	20	32	100	24	39	14	300	29.5
LXV-3245	450	380	110	18	32	—	20	30	—	320	20.0
LXV-3250S	500	500	100	18	28	—	20	33	—	320	30.0
LXV-4250S	500	500	100	18	32	—	20	39	—	420	30.0
LXV-6450S	500	500	100	18	36	—	20	45	—	640	31.5

D.4.34　联板（LV 型）

联板（LV 型）见图 D-47 和表 D-52。

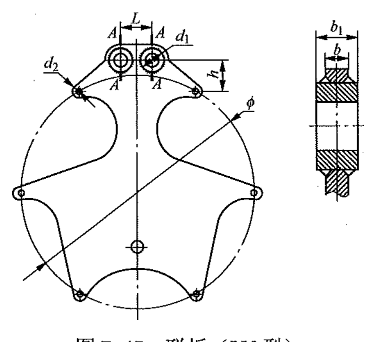


图 D-47　联板（LV 型）

表 D-52　　联　板（LV　型）

型号	主要尺寸（mm）							破坏荷重（kN）	质量（kg）
	ϕ	d_1	d_2	L	h	b_1	b		
LV-1675/6S	750	26	18	100	100	18	18	160	33.5
LV-2175/6SB	750	26	20	100	100	20	18	210	34.2
LV-2175/6SA	750	26	18	100	75	20	16	210	29.8
LV-2175/6	750	30	20	100	100	26	18	210	35.5
LV-2575/6S	750	30	18	100	100	28	18	250	34.5
LV-3075/6S	750	39	18	100	100	32	18	300	34.5
LV-3275/6SB	750	33	20	100	100	28	18	320	35.5
LV-3275/6SA	750	33	18	100	75	28	18	320	33.7
LV-3275/6S	750	33	18	100	100	28	18	320	35.3
LV-4075/6S	750	32	18	100	100	30	18	400	34.5
LV-4275/6SA	750	39	20	100	70	32	18	420	34.3

D.4.35　联板（LXS 型）

联板（LXS 型）见图 D-48 和表 D-53。

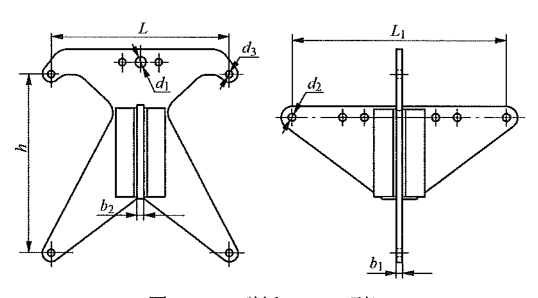


图 D-48　联板（LXS 型）

表 D-53　　联　板（LXS　型）

型号	主要尺寸（mm）								破坏荷重（kN）	质量（kg）
	L	L_1	h	d_1	d_2	d_3	b_1	b_2		
LXS-3045	450	450	450	30	26	24	18	22	300	36.0
LXS-3045/60	450	600	450	30	26	24	18	18	300	38.0
LXS-3245/50	450	500	450	26	26	20	18	20	320	36.0
LXS-3250/60	500	600	500	30	26	20	18	18	320	45.8
LXS-3250/60H	500	600	500	30	26	20	18	18	320	38.3
LXS-3245/45H	450	450	450	26	26	22	18	18	320	31.1
LXS-4245/50H	450	500	450	26	26	20	18	20	420	33.6
LXS-4250/60H	500	600	500	26	26	20	18	20	420	43.5

D.4.36　调平联板（SP 型）

调平联板（SP 型）见图 D-49 和表 D-54。

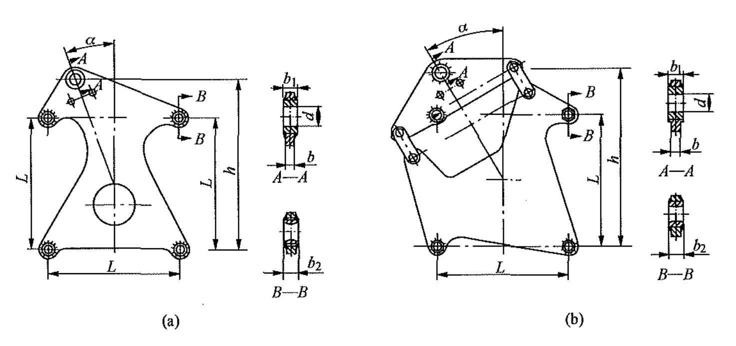


图 D-49　调平联板（SP 型）

表 D-54　　调平联板（SP 型）

型号	主要尺寸（mm）							破坏荷重（kN）	质量（kg）	简图
	α	b_1	b_2	b	d	L	h			
SP10-1645	10°	24	24	18	26	450	582	160	28.2	图 D-49（a）
SP20-1645	20°	24	24	18	26	450	596	160	28.0	图 D-49（a）
SP30-1645	30°	24	24	18	26	450	595	160	39.5	图 D-49（b）
SP40-1645	40°	24	24	18	26	450	560	160	39.5	图 D-49（b）
SP30-1845	30°	30	26	16	33	450	596	180	34.0	图 D-49（b）
SP40-1845	40°	30	26	16	33	450	560	180	33.0	图 D-49（b）
SP30-1845.1	30°	—	18	—	26	450	—	180	26.4	图 D-49（b）下
SP40.1845.1	40°	—	18	—	26	450	—	180	27.7	图 D-49（b）下
SP10-2545	10°	30	26	16	33	450	582	250	23.0	图 D-49（a）
SP20-2545	20°	30	26	16	33	450	596	250	23.0	图 D-49（a）
SP30-2545	30°	30	26	16	33	450	596	250	34.0	图 D-49（b）
SP40-2545	40°	30	26	16	33	450	560	250	33.0	图 D-49（b）
SP10-2545.1	10°	30	18	18	33	450	550	250	25.6	图 D-49（a）
SP20-2545.1	20°	30	18	18	33	450	550	250	25.3	图 D-49（a）
SP30-2545.1	—	30	—	18	33	450	120	250	10.0	图 D-49（b）上
SP40-2545.1	—	30	—	18	33	450	120	250	10.0	图 D-49（b）上

D.4.37　调平联板（LTP 型）

调平联板（LTP 型）见图 D-50 和表 D-55。

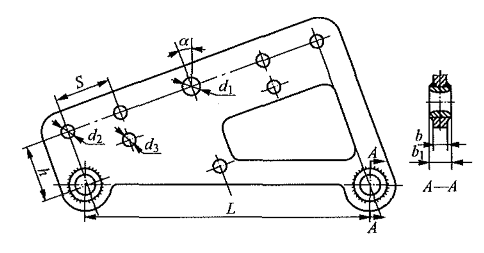


图 D-50　调平联板（LTP 型）

表 D-55 调平联板（LTP型）

型号	主要尺寸（mm）									破坏荷重（kN）	质量（kg）
	α	d_1	d_2	d_3	S	b_1	b	h	L		
LTP-1640-10	10°	26	18	20	80	30	18	80	400	160	10.2
LTP-1640-20	20°	26	18	20	80	30	18	80	400	160	10.1
LTP-1640-30	30°	26	18	20	80	30	18	80	400	160	7.9
LTP-1640-40	40°	26	18	20	80	30	18	80	400	160	9.2

D.4.38 花篮螺丝（HL型）

花篮螺丝（HL型）见图 D-51 和表 D-56。

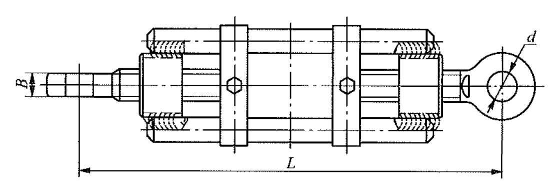


图 D-51 花篮螺丝（HL型）

表 D-56 花篮螺丝（HL型）

型号	调节范围 L	主要尺寸（mm）		破坏荷重（kN）	质量（kg）
		d	B		
HL-103552	350～520	20	16	100	3.5
HL-166498	640～980	26	18	160	7.8
HL-163647	360～470	26	18	160	5.5
HL-164772	470～720	26	18	160	8.6
HL-33	590～890	30	25	210	9.5
HL-36	600～900	33	30	240	8.4

D.5 接续金具

D.5.1 接续管（钢芯铝绞线用，液压搭接型）

接续管（钢芯铝绞线用，液压搭接型）见图 D-52 和表 D-57。

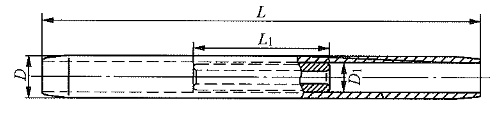


图 D-52 接续管（钢芯铝绞线用，液压搭接型）

表 D-57 接续管（钢芯铝绞线用，液压搭接型）

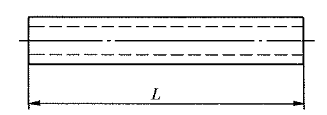
型号	适用导线	主要尺寸（mm）				握力（kN）	质量（kg）
		D	D_1	L	L_1		
JYD-50/30	LGJ-50/30	32	18	300	100	41.0	0.6
JYD-70/40	LGJ-70/40	32	22	330	110	—	0.7

续表

型号	适用导线	主要尺寸（mm）				握力（kN）	质量（kg）
		D	D_1	L	L_1		
JYD-95/15	LGJ-95/15	30	14	290	60	37.3	0.5
JYD-95/20	LGJ-95/20	30	14	340	70	33.3	0.5
JYD-95/55	LGJ-95/55	34	24	370	110	74.0	0.9
JYD-120/20	LGJ-120/20	34	18	330	70	39.0	0.7
JYD-120/70	LGJ-120/70	36	24	370	110	93.5	0.8
JYD-150/20	LGJ-150/20	30	16	340	70	44.3	0.5
JYD-150/25	LGJ-150/25	32	16	350	90	51.4	0.6
JYD-150/35	LGJ-150/35	36	22	360	100	62.0	1.2
JYD-185/25	LGJ-185/25	34	18	420	120	56.5	0.9
JYD-185/30	LGJ-185/30	34	18	420	120	62.0	0.9
JYD-185/45	LGJ-185/45	34	24	360	90	76.0	0.7
JYD-240/30	LGJ-240/30	36	20	460	100	72.0	1.1
JYD-240/40	LGJ-240/40	36	20	440	100	79.0	1.0
JYD-240/55	LGJ-240/55	36	22	470	120	97.0	1.1
JYD-250/40	LGJ-250/40	36	22	525	115	93.7	1.0
JYD-300/15	LGJ-300/15	40	18	470	70	65.0	1.3
JYD-300/20	LGJ-300/20	40	18	490	60	72.0	1.3
JYD-300/25	LGJ-300/25	40	20	480	90	79.0	1.3
JYD-300/40	LGJ-300/40	40	20	490	100	88.0	1.3
JYD-300/50	LGJ-300/50	40	22	490	120	98.0	1.3
JYD-300/70	LGJ-300/70	42	24	520	130	122.0	1.5
JYD-322/52	ASTM	42	24	540	100	106.0	1.41
JYD-400/20	LGJ-400/20	45	18	550	80	84.0	1.8
JYD-400/25	LGJ-400/25	45	20	550	90	91.0	1.8
JYD-400/35	LGJ-400/35	45	22	540	100	99.0	1.8
JYD-400/50	LGJ-400/50	45	24	550	100	117.0	1.9
JYD-400/65	LGJ-400/65	48	26	560	130	129.0	2.3

D.5.2　接续管（钢绞线用，液压对接型）

接续管（钢绞线用，液压对接型）见图 D-53 和表 D-58。



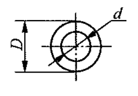


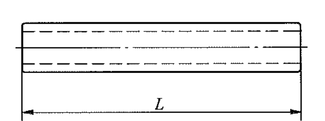
图 D-53　接续管（钢绞线用，液压对接型）

表 D-58　　接续管（钢绞线用，液压对接型）

型号	适用导线	主要尺寸（mm）			握力（kN）	质量（kg）
		D	d	L		
JY-35G	GJ-35	16	8.4	220	45	0.3
JY-50G	GJ-50	18	9.6	240	60	0.4
JY-55G	XLXGJ-55	22	10.2	240	70	0.6
JY-60G	GJ-60	20	10.2	280	75	0.6
JY-70G	GJ-70	22	11.7	290	88	0.7
JY-80G	GJ-80	24	12.2	300	90	0.8
JY-100G	GJ-100	26	13.7	340	123	1.0
JY-125G	GJ-125	28	15.2	380	150	1.3
JY-125GA	GJ-125	32	15.3	420	175	2.0
JY-150G	GJ-150	32	16.5	430	162	2.0
JY-150GC	GJ-150	34	16.6	430	199	2.3

D.5.3　接续管（钢绞线用，爆压搭接型）

接续管（钢绞线用，爆压搭接型）见图 D-54 和表 D-59。



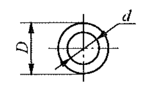


图 D-54　接续管（钢绞线用，爆压搭接型）

表 D-59　　接续管（钢绞线用，爆压搭接型）

型号	适用导线	主要尺寸（mm）			握力（kN）	质量（kg）
		D	d	L		
JBD-35G	GJ-35	22	16	110	45	0.2
JBD-50G	GJ-50	25	17	130	60	0.3
JBD-55G	GJ-55	26	18	130	65	0.3
JBD-70G	GJ-70	28	20	150	88	0.4
JBD-80G	GJ-80	29	21	150	—	0.5
JBD-100G	GJ-100	32	23	170	123	0.6

D.5.4　接续管（钢芯铝绞线用，爆压搭接型）

接续管（钢芯铝绞线用，爆压搭接型）见图 D-55 和表 D-60。

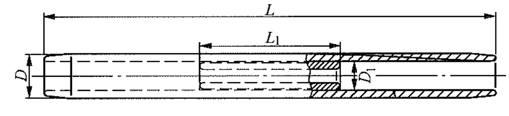


图 D-55　接续管（钢芯铝绞线用，爆压搭接型）

表 D-60 接续管（钢芯铝绞线用，爆压搭接型）

型号	适用导线	主要尺寸（mm）				握力（kN）	质量（kg）
		D	D_1	L	L_1		
JYB-185/25	LGJ-185/25	34	18	380	120	56.5	0.8
JYB-185/30	LGJ-185/30	34	18	380	120	61.1	0.7
JYB-240/30	LGJ-240/30	36	22	430	130	71.9	1.1
JYB-240/40	LGJ-240/40	36	22	430	130	79.2	1.1
JYB-300/40	LGJ-300/40	40	22	430	120	87.0	1.1
JYB-300/50	LGJ-300/50	40	22	450	140	98.0	1.1
JYB-300/70	LGJ-300/70	42	24	510	160	122.0	1.4
JYB-400/35	LGJ-400/35	45	22	510	120	98.8	1.5
JYB-400/50	LGJ-400/50	45	24	510	140	117.0	1.5
JYB-400/65	LGJ-400/65	48	26	520	160	128.0	1.8
JYB-400/95	LGJ-400/95	48	28	550	170	163.0	1.9
JYB-500/65	LGJ-500/65	52	24	560	160	146.0	2.2

D.5.5 预绞式补修条

预绞式补修条见图 D-56 和表 D-61。

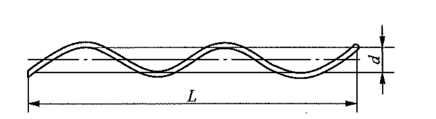


图 D-56 预绞式补修条

表 D-61 预 绞 式 补 修 条

型号	适用导线	主要尺寸（mm）			每组根数	质量（kg）
		D	d	L		
FYB-95/15	LGJ-95/15	3.6	11.4	420	13	0.2
FYB-95/20	LGJ-95/20	3.6	11.4	420	13	0.2
FYB-95/55	LGJ-95/55	3.6	13.3	420	16	0.2
FYB-120/7	LGJ-120/7	3.6	12.0	450	14	0.2
FYB-120/20	LGJ-120/20	3.6	12.5	450	14	0.2
FYB-120/25	LGJ-120/25	3.6	13.0	450	14	0.2
FYB-150/8	LGJ-150/8	3.6	13.3	480	16	0.2
FYB-150/20	LGJ-150/20	3.6	14.7	480	16	0.3
FYB-150/25	LGJ-150/25	3.6	14.2	480	16	0.3
FYB-150/35	LGJ-150/35	3.6	14.5	480	16	0.3
YJB-35	LGJ-35	3.6	7.1	270	9	0.1
YJB-50	LGJ-50	3.6	8.2	300	10	0.1
YJB-70	LGJ-70	3.6	9.7	340	11	0.2
YJB-95	LGJ-95	3.6	11.6	420	13	0.2
YJB-120	LGJ-120	3.6	12.9	450	14	0.2

续表

型号	适用导线	主要尺寸（mm）			每组根数	质量（kg）
		D	d	L		
YJB-150	LGJ-150	3.6	14.2	480	16	0.2
YJB-185	LGJ-185	4.6	16.2	580	14	0.4
YJB-240	LGJ-240	4.6	18.1	640	16	0.5
YJB-300	LGJ-300	6.3	21.4	700	13	0.8
YJB-400	LGJ-400	6.3	23.5	820	14	1.1
YJB-300Q	LGJQ-300	6.3	20.2	700	13	0.8
YJB-400Q	LGJQ-400	6.3	23.3	820	14	1.1
YJB-500Q	LGJQ-500	6.3	25.6	870	16	1.2
YJB-300J	LGJJ-300	6.3	21.8	700	13	0.8
YJB-400J	LGJJ-400	6.3	24.5	825	15	1.1

D.5.6　接地端子

接地端子见图 D-57 和表 D-62。

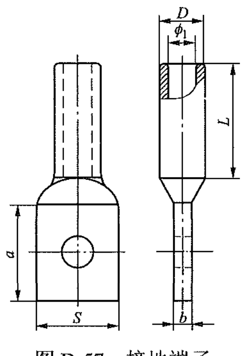


图 D-57　接地端子

表 D-62　　接　地　端　子

型号	主要尺寸（mm）						质量（kg）
	ϕ_1	a	b	D	S	L	
JDBG-80	13.0	65	8	22	40	70	0.12
JDBG-100	15.0	65	8	26	40	80	0.16
JDBG-120	16.0	85	10	26	50	80	0.21
JDBG-150	17.5	85	10	30	50	90	0.28

D.5.7　并沟线夹

并沟线夹见图 D-58 和表 D-63。

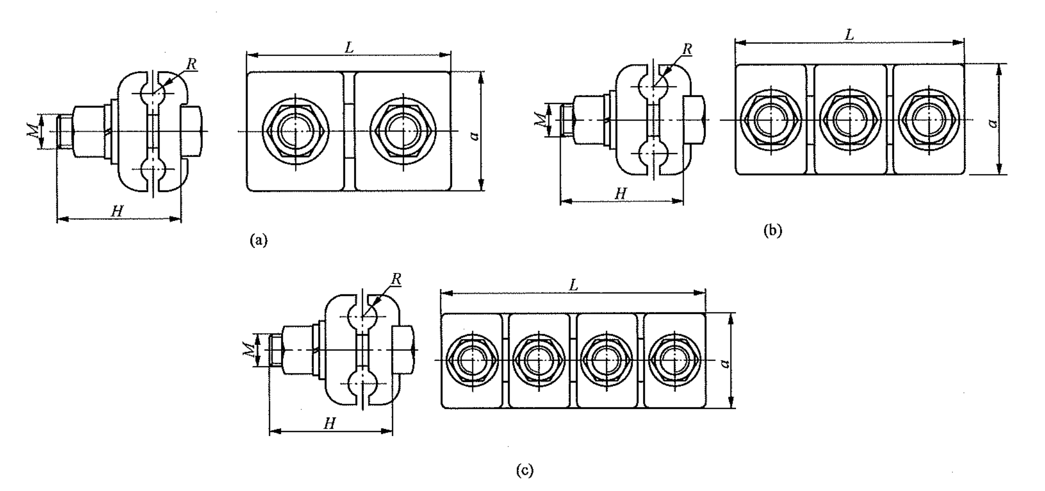


图 D-58　并沟线夹

表 D-63　　井　沟　线　夹

型号	适用导线截面（mm²）	主要尺寸（mm）					质量（kg）	简图
		a	*M*	*L*	*R*	*H*		
JB-0	16～25	38	10	72	3.5	35	0.2	(a)
JB-1	25～50	46	12	80	5.0	45	0.4	(a)
JB-2	70～95	54	12	114	7.0	55	0.7	(b)
JB-3	120～150	64	16	140	8.5	60	1.1	(b)
JB-4	185～240	72	16	144	11.0	65	1.3	(b)
JB-5	300～460	100	18	215	15.0	75	2.5	(c)
JB-6	500～630	110	20	230	18.0	85	3.1	(c)

D.6　保护金具

D.6.1　防振锤（FD、FG 型）

防振锤（FD、FG 型）见图 D-59 和表 D-64。

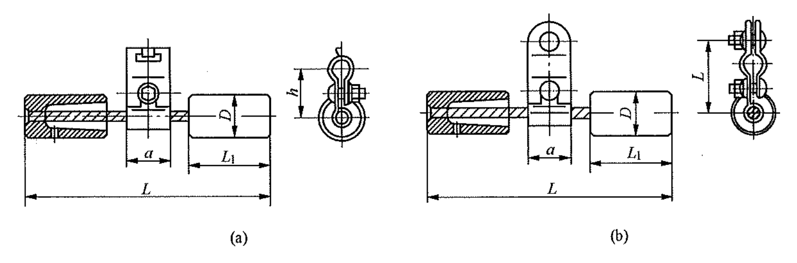


图 D-59　防振锤（FD、FG 型）

表 D-64　　防振锤（FD、FG 型）

型号	适用绞线截面（mm^2）		主要尺寸（mm）					锤头质量（kg）	质量（kg）	简图
	钢绞线	铝绞线，钢芯铝绞线	L	L_1	D	a	h			
FD-1	—	35～50	300	95	40	40	40	0.5	1.5	(b)
FD-2	—	70～90	370	130	46	45	55	0.9	2.4	(a)
FD-3	—	120～150	450	150	56	60	65	1.7	4.5	(a)
FD-4	—	185～240	500	175	62	60	70	2.2	5.6	(a)
FD-5	—	300～500	550	200	67	70	75	3.0	7.2	(a)
FD-6	—	500～630	550	200	70	70	75	3.6	8.6	(a)
FG-35	35	—	300	100	42	45	50	0.6	1.8	(b)
FG-50	50	—	350	130	46	45	50	0.9	2.4	(b)
FG-70	70	—	400	150	56	50	60	1.7	4.2	(a)
FG-100	100	—	500	175	62	60	65	2.4	5.9	(a)
FG-135	120～150	—	500	175	62	50	81	2.4	5.7	(a)
FG-225	135	—	500	175	62	50	81	2.4	5.7	(a)

D.6.2　防振锤（FF 型）

防振锤（FF 型）见图 D-60 和表 D-65。

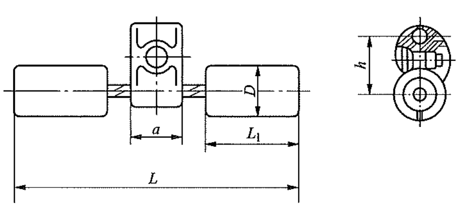


图 D-60　防振锤（FF 型）

表 D-65　　防振锤（FF 型）

型号	适用导线直径（mm）	主要尺寸（mm）					质量（kg）
		L	L_1	D	h	a	
FF-4	18.0～22.0	500	175	62	80	50	5.0
FF-5	23.0～26.0	550	200	67	70	70	7.4
FF-5.1	23.0～26.0	550	200	67	70	70	7.4
FF-5.2	34.0～37.0	550	200	67	80	70	7.7
FF-4.2	34.0～37.0	500	175	62	80	70	5.8
FF-5/41	41.0	550	200	67	81	70	7.7

D.6.3　防振锤（FR 型）

防振锤（FR 型）见图 D-61 和表 D-66。

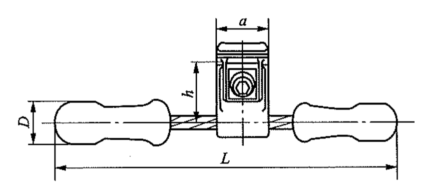


图 D-61　防振锤（FR 型）

表 D-66　　防 振 锤（FR 型）

型号	适用导线直径（mm）	主要尺寸（mm）				质量（kg）
		L	*D*	*h*	*a*	
FR-1	7.0～12.0	429	48	81	50	2.8
FR-2A	11.0～12.0	429	48	81	50	2.8
FR-2B	12.0～15.0	429	48	81	50	2.8
FR-2C	15.0～18.0	429	48	81	50	2.8
FR-2	18.0～22.0	429	48	81	50	2.8
FR-3	18.0～28.0	505	57	91	60	5.0
FR-3A	34.0～36.0	505	57	96	60	5.0
FR-4	23.0～36.0	550	64	97	60	7.6
FR-4A	38.0～40.0	550	64	102	60	7.6
FR-5	35.0～37.0	590	70	140	70	11.4

D.6.4　预绞式防振锤（FDN 型）

预绞式防振锤（FDN 型）见图 D-62 和表 D-67。

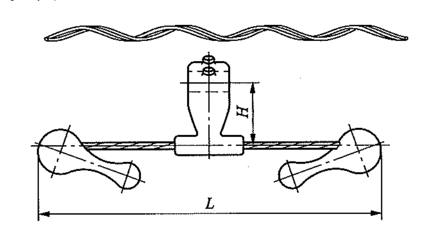


图 D-62　预绞式防振锤（FDN 型）

表 D-67　　预绞式防振锤（FDN 型）

型号	适用绞线直径（含包缠物）（mm）	主要尺寸（mm）		质量（kg）
		H	*L*	
FDN-11YTXL	7.0～11.0	60	420	1.7
FDN-16YTXL	11.1～16.0	65	420	1.9
FDN-20YTXL	16.1～20.0	70	460	3.2
FDN-24YXL	20.1～24.0	70	460	3.2
FDN-27YXL	24.1～27.0	75	490	5
FDN-30YXL	27.1～30.0	80	490	5.4
FDN-34YXL	30.1～34.0	90	490	7.5
FDN-40YXL	34.1～40.0	100	490	7.6

D.6.5　间隔棒（FJZ 型双导线用，阻尼型）

间隔棒（FJZ 型双导线用，阻尼型）见图 D-63 和表 D-68。

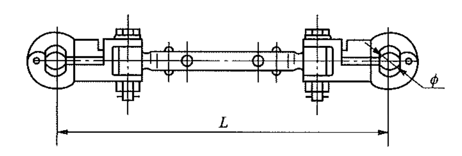


图 D-63　间隔棒（FJZ 型双导线用，阻尼型）

表 D-68　　间隔棒（FJZ 型双导线用，阻尼型）

型号	适用导线	主要尺寸（mm）		质量（kg）
		L	ϕ	
FJZ-240/300	LGJ-300/20～50	400	19.4	3.1
FJZ-240/300A	LHBGJ-300/70	400	21.2	3.1
FJZ-240/400	LGJ-400/50～65	400	24.0	3.1
FJZ-250/630	LGJ-630/45	500	33.0	3.8

D.6.6　间隔棒（FJZ 型双导线用，防翻转型）

间隔棒（FJZ 型双导线用，防翻转型）见图 D-64 和表 D-69。

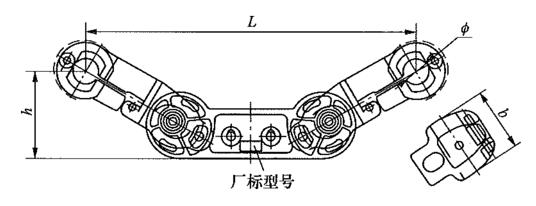


图 D-64　间隔棒（FJZ 型双导线用，防翻转型）

表 D-69　　间隔棒（FJZ 型双导线用，防翻转型）

型号	适用导线	主要尺寸（mm）				质量（kg）
		b	h	L	ϕ	
FJZ-255/400	LGJ-400/50～95	56	148	550	27.0	6.2
FJZ-240G/400	LGJ-400/35	88	131	400	22.8	9.8
FJZ-260/640	AACSR/EST-640/290	96	138	600	38.8	10.0
FJZ-265/720N	KTACSR/EST-720	96	138	650	40.6	10.2

D.6.7　TJ 跳线间隔棒

TJ 跳线间隔棒见图 D-65 和表 D-70。

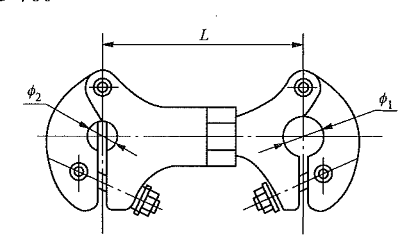


图 D-65　TJ 跳线间隔棒

表 D-70 TJ 跳线间隔棒

型号	主要尺寸（mm）			质量（kg）
	ϕ_1	ϕ_2	L	
TJ_2-12240	22	18	120～145	0.9
TJ_2-12300	26	18	120～145	0.9
TJ_2-12400	28	22	120～145	0.9
TJ_2-12500	31	23	120～140	1.2
TJ_2-12630	34	26	120～135	1.1
TJ_2-12720	38	26	120～145	1.1
TJ_2-12420	36	26	120～135	1.1
TJ_2-12500.1	36	30	120～135	1.2
TJ_2-12630/19	34	19	120～135	1.1
TJ_2-12630/23	34	23	120～135	1.1
TJ_2-12630/30	34	31	120～135	1.2
TJ_2-12720/19	38	19	120～135	1.1
TJ-135400	37	28	125～150	1.5
TJ-135/500	43	30	135	1.2
TJ_2-135630.1	36	27	130～150	1.2
TJ-135/720	38	30	135	1.5
TJ_2-12400/18	28	18	120～145	0.9
TJ_2-12400/26	28	26	120～145	0.9

D.6.8 间隔棒（三分裂导线用）

间隔棒（三分裂导线用）见图 D-66 和表 D-71。

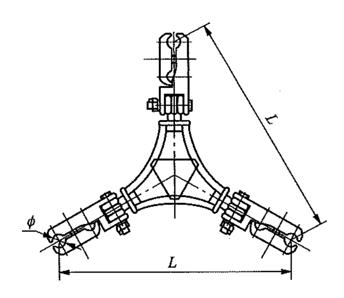


图 D-66 间隔棒（三分裂导线用）

表 D-71 间隔棒（三分裂导线用）

型号	适用导线	主要尺寸（mm）		质量（kg）
		L	ϕ	
JX3-300	LGJQ-300	450	26	5.6
JX3-400	LGJQ-400	450	29	5.6

D.6.9 阻尼间隔棒

阻尼间隔棒见图 D-67 和表 D-72。

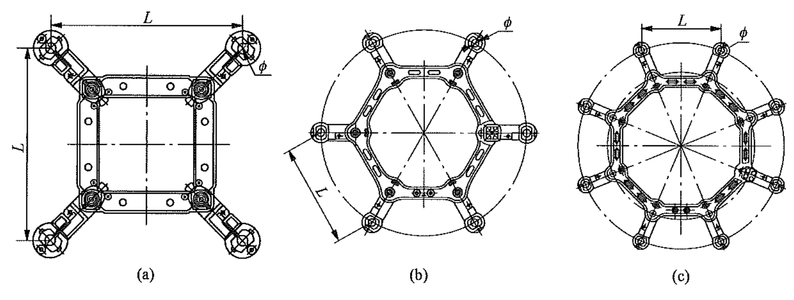


图 D-67 阻尼间隔棒

表 D-72 阻尼间隔棒

型号	适用导线	主要尺寸（mm）		质量（kg）	简图
		L	ϕ		
FJZ-445F/300	LGJ-300/20～50	450	19.4	6.5	图 D-67（a）
FJZ-445F/300A	LGJ-300/70	450	21.2	6.5	图 D-67（a）
FJZ-445F/400	LGJ-400/50～65	450	24.0	6.5	图 D-67（a）
FJZ-445F/400A	LGJ-400/20～35	450	22.8	6.5	图 D-67（a）
FJZ-445F/400B	LGJ-400/95	450	25.2	6.5	图 D-67（a）
FJZ-445F/630	LGJ-630/45	450	33.0	10.1	图 D-67（a）
FJZ-445F/500.550A	LGJ-500	450	—	6.7	图 D-67（a）
FJZ-450F/500	LGJHT-500/65	500	30.4	8.3	图 D-67（a）
FJZ-450F/630	LGJ-630/45	500	33.0	8.3	图 D-67（a）
FJZ-450F/720	LGJ-720/50	500	35.6	10.4	图 D-67（a）
FJZF7-640/25	LGJ-300/40	400	25	13.0	图 D-67（b）
FJZF7-640/28	LGJ-400/50	400	28	13.0	图 D-67（b）
FJZF7-640/30	LGJ-500/45	400	30	13.0	图 D-67（b）
FJZ-840/31D	LGJ-500/45	400	31	17.8	图 D-67（c）
FJZ-840/34D	LGJ-630/45	400	34	18.5	图 D-67（c）

D.6.10 十字型阻尼间隔棒

十字型阻尼间隔棒见图 D-68 和表 D-73。

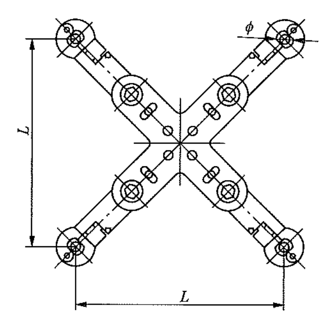


图 D-68 十字型阻尼间隔棒

表 D-73　　十字型阻尼间隔棒

型号	适用导线	主要尺寸（mm）		质量（kg）
		L	*ϕ*	
FJZ-300	LGJ-300/20～50	450	19.4	8.7
FJZ-300A	LGJ-300/70	450	21.2	8.7
FJZ-400A	LGJ-400/20～35	450	22.8	8.7
FJZ-400	LGJ-400/50～65	450	24.0	8.7
FJZ-400B	LGJ-400/95	450	25.2	8.7

D.6.11　预绞式间隔棒

预绞式间隔棒见图 D-69 和表 D-74。

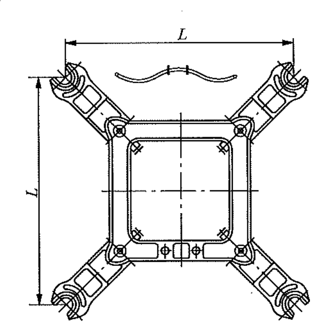


图 D-69　预绞式间隔棒

表 D-74　　预绞式间隔棒

型号	适用绞线直径	主要尺寸（mm）	质量（kg）
		L	
FJZY-445F/240	LGJ-240/30，240/40，240/55	450	9.0
FJZY-445F/300	LGJ-300/15，300/20，300/25，300/40，300/50	450	9.0
FJZY-445F/300A	LGJ-300/70	450	9.0
FJZY-445F/400	LGJ-400/20，400/25，400/35，400/50	450	9.2
FJZY-445F/400A	LGJ-400/65，400/95	450	9.2
FJZY-445F/500	LGJ-500/35，500/45，500/65	450	9.5
FJZY-445F/630	LGJ-630/45，630/55，630/80	450	9.5
FJZY-445F/720	LGJ-720/50	450	9.5
FJZY-450F/240	LGJ-240/30，240/40，240/55	500	9.2
FJZY-450F/300	LGJ-300/15，300/20，300/25，300/40，300/50	500	9.2
FJZY-450F/300A	LGJ-300/70	500	9.2
FJZY-450F/400	LGJ-400/20，400/25，400/35，400/50	500	9.4
FJZY-450F/400A	LGJ-400/65，400/95	500	9.4
FJZY-450F/500	LGJ-500/35，500/45，500/65	500	9.6
FJZY-450F/630	LGJ-630/45，630/55，630/80	500	9.6
FJZY-450F/720	LGJ-720/50	500	9.6

D.6.12 支撑式刚性间隔棒

支撑式刚性间隔棒见图 D-70 和表 D-75。

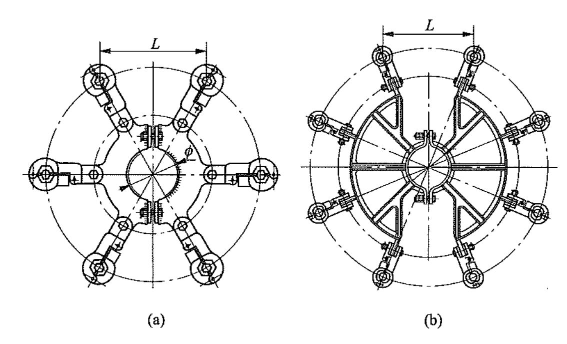


图 D-70 支撑式刚性间隔棒

表 D-75 支撑式刚性间隔棒

型号	主要尺寸（mm）			质量（kg）	简图
	适用导线直径	L	ϕ		
FJGY-630/28CZ	28	300	134	14.6	图 D-70（a）
FJGY-630/31CZ	31	300	134	14.6	图 D-70（a）
FJGY-840/31DZ	31	400	180	28.3	图 D-70（b）
FJGY-840/41DZ	41	400	180	28.3	图 D-70（b）

D.6.13 均压环（单联悬垂串用）

均压环（单联悬垂串用）见图 D-71 和表 D-76。

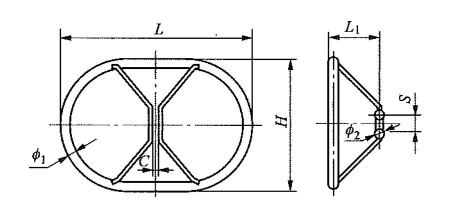


图 D-71 均压环（单联悬垂串用）

表 D-76 均压环（单联悬垂串用）

型号	主要尺寸（mm）							质量（kg）
	L	L_1	H	S	ϕ_1	ϕ_2	C	
FJP-500XD	700	290	600	80	50	14	20	8.8
FJP-500XD$_1$	700	270	600	45	50	14	50	9.0
FJP-500X4	1150	490	1150	80	50	18	30	20.1
FJP-500XDL	700	290	600	80	50	14	20	3.9
FJP-500XDL$_1$	800	290	700	80	50	18	20	4.8
FJP-500XDL$_2$	700	290	600	80	50	14	20	4.1
FJP-500XDL$_3$	800	210	700	80	50	18	20	4.6
FJP-500XDL$_4$	700	290	600	40	50	14	20	4.1
FJP-500XD$_1$L	700	270	600	45	50	14	50	3.9
FJP-500XD$_1$L$_1$	700	270	600	45	50	13.5	50	3.6

D.6.14　均压环（双联悬垂串用）

均压环（双联悬垂串用）见图 D-72 和表 D-77。

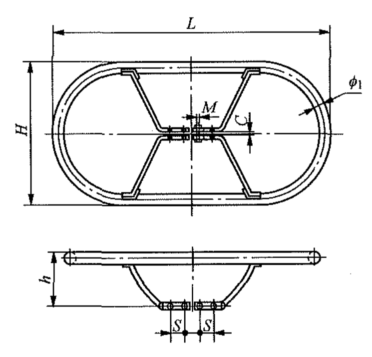


图 D-72　均压环（双联悬垂串用）

表 D-77　　均压环（双联悬垂串用）

型号	主要尺寸（mm）							质量（kg）
	L	H	h	ϕ_1	M	S	C	
FJP-500XS	1050	600	230	50	16	60	22	11.5
FJL-500XS	1050	600	230	50	16	60	22	4.5
FJP-500XSL	1050	600	230	50	12	60	24	4.4
FJ-500XSL$_1$	1200	600	230	50	16	60	20	6.1
FJ-500XSL$_2$	1280	680	260	50	16	60	20	6.3
FJ-500XSL$_3$	1140	680	260	50	16	60	20	5.6
FJ-500XSL$_4$	1280	680	305	50	16	60	30	7.6

D.6.15　均压屏蔽环（耐张串用）

均压屏蔽环（耐张串用）见图 D-73 和表 D-78。

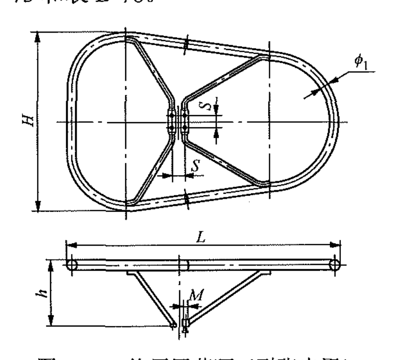


图 D-73　均压屏蔽环（耐张串用）

表 D-78　　均压屏蔽环（耐张串用）

型号	主要尺寸（mm）						质量（kg）
	H	h	S	ϕ_1	M	L	
FJP-500N	900	330	60	50	16	1450	18.5
FJP-500NL	900	330	60	50	16	1450	6.7
FJP-500NL1	900	380	60	50	16	1450	7.9
FJP-500NL2	900	380	60	50	16	1570	8.4
FJP-500NL3	900	380	60	50	16	1800	9.3
FJP-500NL4	800	380	60	50	16	1680	8.4

D.6.16 马鞍型均压环（V 型串用）

马鞍型均压环（V 型串用）见图 D-74 和表 D-79。

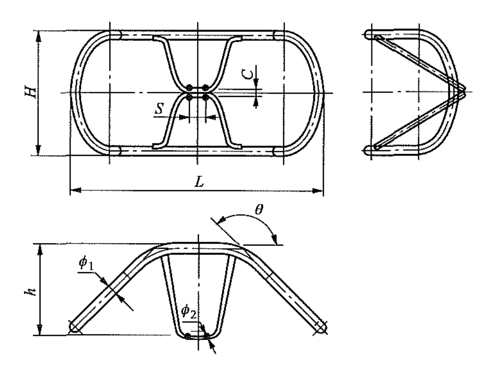


图 D-74 马鞍型均压环（V 型串用）

表 D-79 马鞍型均压环（V 型串用）

型号	主要尺寸（mm）								质量（kg）
	L	H	h	ϕ_1	ϕ_2	S	C	θ	
FJP-500XV/45	1213	600	440	50	18	80	22	135	7.1
LJ_2-500XV/50	1236	600	492	50	18	80	20	130	7.2
LJ_2-500XV/45	1156	600	463	60	18	80	26	135	8.7
LJ_2-500XV-L	1149	600	430	60	18	80	28	126	9.2

D.6.17 重锤片（倒梯型）

重锤片（倒梯型）见图 D-75 和表 D-80。

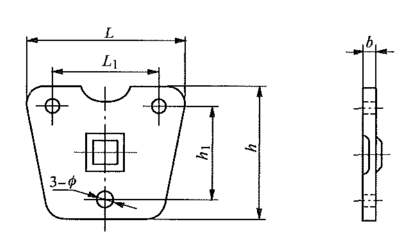


图 D-75 重锤片（倒梯型）

表 D-80 重锤片（倒梯型）

型号	主要尺寸（mm）						质量（kg）
	L	L_1	h	h_1	b	ϕ	
ZC-18	350	240	320	220	30	24	20.0
ZC-18C	366	240	335	220	30	24	21.8
ZC-30T	350	240	300	220	48	24	30.0
ZC-18B	320	240	300	220	37	24	20.0

D.6.18 重锤片（T 字型）

重锤片（T 字型）见图 D-76 和表 D-81。

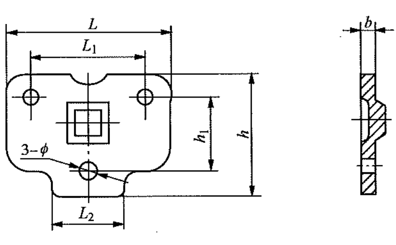


图 D-76　重锤片（T 字型）

表 D-81　　重 锤 片（T 字 型）

型号	主要尺寸（mm）							质量（kg）
	L	L_1	L_2	h	h_1	b	ϕ	
ZC-20	390	240	200	325	220	30	24	20.0
ZC-22	420	240	170	310	225	32	24	22.0
ZC-25	420	240	170	310	225	34	20	25.0
ZC-20G	390	240	220	330	225	30	24	21.8
ZC-30	416	280	120	240	128	48	25	30.0

D.6.19　重锤片（鼠笼式跳线用）

重锤片（鼠笼式跳线用）见图 D-77 和表 D-82。

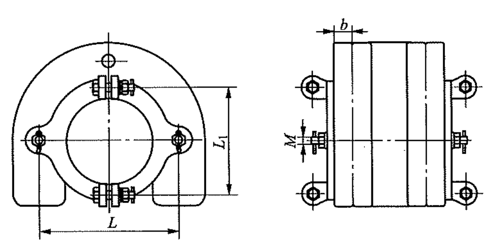


图 D-77　重锤片（鼠笼式跳线用）

表 D-82　　重锤片（鼠笼式跳线用）

型号	主要尺寸（mm）				质量（kg）
	L	L_1	M	b	
FZC-25	300	230	18	30	25

D.6.20　悬重锤及其附件

悬重锤及其附件见图 D-78 和表 D-83。

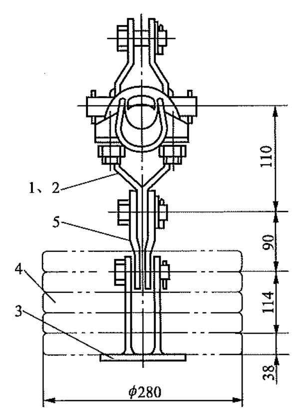


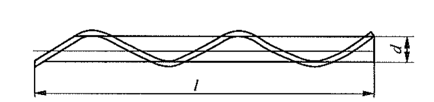
图 D-78　悬重锤及其附件

表 D-83　　悬重锤及其附件

编号	名称	型号	质量（kg）
1	重锤挂板	ZG-1	0.3
2	重锤挂板	ZG-2	0.3
3	重锤座	ZJ-1	1.5
4	重锤片	ZC-1	15.0
5	平行挂板	PS-7	0.5

D.6.21　预绞丝护线条

预绞丝护线条见图 D-79 和表 D-84。



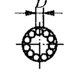


图 D-79　预绞丝护线条

表 D-84　　预绞丝护线条

型号	适用导线	主要尺寸（mm）			每组根数	质量（kg）
		D	d	L		
FYH-95/15	LGJ-95/15	3.6	11.4	1400	13	0.5
FYH-95/20	LGJ-95/20	3.6	11.4	1400	13	0.5
FYH-95/55	LGJ-95/55	3.6	13.3	1500	16	0.6
FYH-120/7	LGJ-120/7	3.6	12.0	1400	14	0.6
FYH-120/20	LGJ-120/20	3.6	12.5	1400	14	0.6
FYH-120/25	LGJ-120/25	3.6	13.0	1400	14	0.6
FYH-120/70	LGJ-120/70	4.6	14.9	1800	14	0.8
FYH-150/8	LGJ-150/8	3.6	13.3	1500	16	0.6
FYH-150/20	LGJ-150/20	3.6	14.7	1500	16	0.7
FYH-150/25	LGJ-150/25	3.6	14.2	1500	16	0.7
FYH-150/35	LGJ-150/35	3.6	14.5	1500	16	0.7
FYH-185/10	LGJ-185/10	4.6	14.9	1800	14	1.2
FYH-185/25	LGJ-185/25	4.6	15.7	1800	14	1.3
FYH-185/30	LGJ-185/30	4.6	15.7	1800	14	1.3
FYH-185/45	LGJ-185/45	4.6	16.3	1800	14	1.3
FYH-210/10	LGJ-210/10	4.6	15.9	1800	14	1.3
FYH-210/25	LGJ-210/25	4.6	16.6	1800	14	1.3
FYH-210/35	LGJ-210/35	4.6	16.9	1800	14	1.3
FYH-210/50	LGJ-210/50	4.6	17.3	1800	14	1.3
FYH-240/30	LGJ-240/30	4.6	17.9	1900	16	1.4
FYH-240/40	LGJ-240/40	4.6	17.9	1900	16	1.4
FYH-240/55	LGJ-240/55	4.6	18.6	1900	16	1.4
FYH-300/15	LGJ-300/15	6.3	19.1	2000	13	2.3
FYH-300/20	LGJ-300/20	6.3	19.4	2000	13	2.3

续表

型号	适用导线	主要尺寸（mm）			每组根数	质量（kg）
		D	*d*	*L*		
FYH-300/25	LGJ-300/25	6.3	19.7	2000	13	2.3
FYH-300/40	LGJ-300/40	6.3	19.9	2000	13	2.3
FYH-300/50	LGJ-300/50	6.3	20.1	2000	13	2.3
FYH-300/70	LGJ-300/70	6.3	20.9	2000	13	2.3
FYH-400/20	LGJ-400/20	6.3	22.3	2200	14	2.8
FYH-400/25	LGJ-400/25	6.3	22.1	2200	14	2.8
FYH-400/35	LGJ-400/35	6.3	22.3	2200	14	2.8
FYH-400/50	LGJ-400/50	6.3	23.0	2200	14	2.8
FYH-400/65	LGJ-400/65	6.3	23.2	2200	14	2.8
FYH-400/95	LGJ-400/95	6.3	24.8	2500	14	2.8
FYH-500/35	LGJ-500/35	6.3	24.9	2500	16	3.5
FYH-500/45	LGJ-500/45	6.3	24.9	2500	16	3.5
FVH-500/65	LGJ-500/65	6.3	25.7	2500	16	3.5
FYH-630/45	LGJ-630/45	7.8	27.9	2500	15	5.3
FYH-630/55	LGJ-630/55	7.8	28.5	2500	15	5.3
FYH-630/80	LGJ-630/80	7.8	28.9	2500	15	5.3
FYH-720/50	LGJ-720/50	7.8	30.8	3000	15	6.4
FYH-800/35	LGJ-800/35	7.8	31.8	2500	17	6.0
FYH-800/70	LGJ-800/70	7.8	32.1	2500	17	6.0
FYH-800/100	LGJ-800/100	7.8	32.3	2500	17	6.0

D.6.22　铝包带

铝包带见图 D-80 和表 D-85。



图 D-80　铝包带

表 D-85　　　　**铝　包　带**

型号	主要尺寸（mm）	质量	
		kg/m	m/kg
FLD-1	1×10	0.027	37

附录E 弱电线路、公路及航道等级划分

E.1 弱电线路等级

一级：首都与各省（市）、自治区所在地及其相互间联系的主要线路；首都至各重要工矿城市、海港的线路以及由首都通达国外的国际线路；由邮电部门指定的其他国际线路和国防线路；铁道总公司与各铁路分公司及各铁路分公司之间联系用的线路；以及铁路信号自动闭塞装置专用线路。

二级：各省（市）、自治区所在地与各地（市）、县及其相互间的通信线路；相邻两省（自治区）各地（市）、县相互间的通信线路；一般市内电话线路；铁路公司与各站、段及站段相互间的线路，以及铁路信号闭塞装置的线路。

三级：县至区、乡的县内线路和两对以下的城郊线路；铁路的地区线路及有线广播线路。

E.2 公路等级

（1）高速公路为专供汽车分向、分车道行驶并应全部控制出入的多车道公路。

四车道高速公路应能适应将各种汽车折合成小客车的年平均日交通量25000～55000辆；

六车道高速公路应能适应将各种汽车折合成小客车的年平均日交通量45000～85000辆；

八车道高速公路应能适应将各种汽车折合成小客车的年平均日交通量60000～100000辆。

（2）一级公路为供汽车分向、分车道行驶，并可根据需要控制出入的多车道公路。

四车道一级公路应能适应将各种汽车折合成小客车的年平均日交通量15000～30000辆；

六车道一级公路应能适应将各种汽车折合成小客车的年平均日交通量25000～55000辆。

（3）二级公路为供汽车行驶的双车道公路。

双车道二级公路应能适应将各种汽车折合成小客车的年平均日交通量5000～15000辆。

（4）三级公路为主要供汽车行驶的双车道公路。

双车道三级公路应能适应将各种汽车折合成小客车的年平均日交通量2000～6000辆。

（5）四级公路为主要供汽车行驶的双车道或单车道公路。

双车道四级公路应能适应将各种汽车折合成小客车的年平均日交通量2000辆以下；

单车道四级公路应能适应将各种汽车折合成小客车的年平均日交通量400辆以下。

E.3 航道等级

根据GB 50139—2014《内河通航标准》的规定，我国航道等级由高到低分Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ级航道，这7级航道均可称为等级航道。通航标准低于Ⅶ级的航道可称为等外级航道。航道等级划分见表E-1。

表E-1 航道等级划分

航道等级	船舶吨级（t）
Ⅰ	3000
Ⅱ	2000
Ⅲ	1000
Ⅳ	500
Ⅴ	300
Ⅵ	100
Ⅶ	50

表中船舶吨位按船舶设计载重吨确定，通航3000吨级以上船舶的航道列入Ⅰ级航道。

附录F　钢　　材

F.1　角钢

F.1.1　热轧等边角钢尺寸、外形、质量及允许偏差

GB/T 706—2016 适用于热轧等边角钢，根据需要摘录如下。

F.1.1.1　尺寸

（1）截面尺寸及允许偏差：

1）等边角钢的截面图示及标注符号如图 F-1 所示。

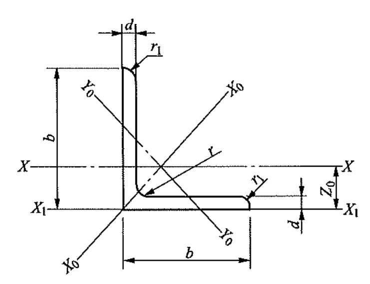


图 F-1　等边角钢截面图

b—边宽度；d—边厚度；r—内圆弧半径；r_1—边端圆弧半径；Z_0—重心距离

2）等边角钢的尺寸、截面面积、理论质量及截面特性参数应符合表 F-1、表 F-3 的规定。

3）截面尺寸允许偏差。角钢的边宽度 b、边厚度 δ尺寸允许偏差应符合表 F-2 的规定。

（2）长度及允许偏差。

1）角钢的通常长度为 4000～19000mm，其他型钢的通常长度为 5000～19000mm，根据需方要求也可供应其他长度产品。

2）定尺、倍尺长度。等边角钢按定尺或倍尺长度交货时应在合同中注明，当型钢长度小于等于 8m 时其长度允许偏差为 $^{+50}_{0}$ mm，当型钢长度大于 8m 时其长度允许偏差为 $^{+80}_{0}$ mm。

F.1.1.2　质量及允许偏差

（1）等边角钢按理论质量或实际质量交货。

（2）等边角钢计算理论质量时，钢的密度为 7.85g/cm^3。

（3）等边角钢质量允许偏差不得超过±5%。

F.1.1.3　包装、标记及质量证明书

型钢的包装、标记及质量证明书应符合 GB/T 2101 的规定。

表 F-1　　等边角钢截面尺寸、截面面积、理论质量及截面特性

型号	截面尺寸（mm）			截面面积（cm^2）	理论质量（kg/m）	外表面积（m^2/m）	惯性矩（cm^4）				惯性半径（cm）			截面模数（cm^3）			重心距离（cm）
	b	d	r				I_x	I_{x1}	I_{x0}	I_{y0}	i_x	i_{x0}	i_{y0}	W_x	W_{x0}	W_{y0}	Z_0
2	20	3	3.5	1.132	0.89	0.078	0.40	0.81	0.63	0.17	0.59	0.75	0.39	0.29	0.45	0.20	0.60
		4		1.459	1.15	0.077	0.50	1.09	0.78	0.22	0.58	0.73	0.38	0.36	0.55	0.24	0.64
2.5	25	3		1.432	1.12	0.098	0.82	1.57	1.29	0.34	0.76	0.95	0.49	0.46	0.73	0.33	0.73
		4		1.859	1.46	0.097	1.03	2.11	1.62	0.43	0.74	0.93	0.48	0.59	0.92	0.40	0.76
3.0	30	3	4.5	1.749	1.37	0.117	1.46	2.71	2.31	0.61	0.91	1.15	0.59	0.68	1.09	0.51	0.85
		4		2.276	1.79	0.117	1.84	3.63	2.92	0.77	0.90	1.13	0.58	0.87	1.37	0.62	0.89
3.6	36	3		2.109	1.66	0.141	2.58	4.68	4.09	1.07	1.11	1.39	0.71	0.99	1.61	0.76	1.00
		4		2.756	2.16	0.141	3.29	6.25	5.22	1.37	1.09	1.38	0.70	1.28	2.05	0.93	1.04
		5		3.382	2.65	0.141	3.95	7.84	6.24	1.65	1.08	1.36	0.7	1.56	2.45	1.00	1.07
4	40	3	5	2.359	1.85	0.157	3.59	6.41	5.69	1.49	1.23	1.55	0.79	1.23	2.01	0.96	1.09
		4		3.086	2.42	0.157	4.60	8.56	7.29	1.91	1.22	1.54	0.79	1.60	2.58	1.19	1.13
		5		3.792	2.98	0.156	5.53	10.7	8.76	2.30	1.21	1.52	0.78	1.96	3.10	1.39	1.17

续表

型号	截面尺寸（mm）			截面面积（cm^2）	理论质量（kg/m）	外表面积（m^2/m）	惯性矩（cm^4）				惯性半径（cm）			截面模数（cm^3）			重心距离（cm）
	b	d	r				I_x	I_{x1}	I_{x0}	I_{y0}	i_x	i_{x0}	i_{y0}	W_x	W_{x0}	W_{y0}	Z_0
4.5	45	3	5	2.659	2.09	0.177	5.17	9.12	8.20	2.14	1.40	1.76	0.89	1.58	2.58	1.24	1.22
		4		3.486	2.74	0.177	6.65	12.2	10.6	2.75	1.38	1.74	0.89	2.05	3.32	1.54	1.26
		5		4.292	3.37	0.176	8.04	15.2	12.7	3.33	1.37	1.72	0.88	2.51	4.00	1.81	1.30
		6		5.077	3.99	0.176	9.33	18.4	14.8	3.89	1.36	1.70	0.80	2.95	4.64	2.06	1.33
5	50	3	5.5	2.971	2.33	0.197	7.18	12.5	11.4	2.98	1.55	1.96	1.00	1.96	3.22	1.57	1.34
		4		3.897	3.06	0.197	9.26	16.7	14.7	3.82	1.54	1.94	0.99	2.56	4.16	1.96	1.38
		5		4.803	3.77	0.196	11.2	20.9	17.8	4.64	1.53	1.92	0.98	3.13	5.03	2.31	1.42
		6		5.688	4.46	0.196	13.1	25.1	20.7	5.42	1.52	1.91	0.98	3.68	5.85	2.63	1.46
5.6	56	3	6	3.343	2.62	0.221	10.2	17.6	16.1	4.24	1.75	2.20	1.13	2.48	4.08	2.02	1.48
		4		4.39	3.45	0.220	13.2	23.4	20.9	5.46	1.73	2.18	1.11	3.24	5.28	2.52	1.53
		5		5.415	4.25	0.220	16.0	29.3	25.4	6.61	1.72	2.17	1.10	3.97	6.42	2.98	1.57
		6		6.42	5.04	0.220	18.7	35.3	29.7	7.73	1.71	2.15	1.10	4.68	7.49	3.40	1.61
		7		7.404	5.81	0.219	21.2	41.2	33.6	8.82	1.69	2.13	1.09	5.36	8.49	3.80	1.64
		8		8.367	6.57	0.219	23.6	47.2	37.4	9.89	1.68	2.11	1.09	6.03	9.44	4.16	1.68
6	60	5	6.5	5.829	4.58	0.236	19.9	36.1	31.6	8.21	1.85	2.33	1.19	4.59	7.44	3.48	1.67
		6		6.914	5.43	0.235	23.4	43.3	36.9	9.60	1.83	2.31	1.18	5.41	8.70	3.98	1.70
		7		7.977	6.26	0.235	26.4	50.7	41.9	11.0	1.82	2.29	1.17	6.21	9.88	4.45	1.74
		8		9.02	7.08	0.235	29.5	58.0	46.7	12.3	1.81	2.27	1.17	6.98	11.0	4.88	1.78
6.3	63	4	7	4.978	3.91	0.248	19.0	33.4	30.2	7.89	1.96	2.46	1.26	4.13	6.78	3.29	1.70
		5		6.143	4.82	0.248	23.2	41.7	36.8	9.57	1.94	2.45	1.25	5.08	8.25	3.90	1.74
		6		7.288	5.72	0.247	27.1	50.1	43.0	11.2	1.93	2.43	1.24	6.00	9.66	4.46	1.78
		7		8.412	6.60	0.247	30.9	58.6	49.0	12.8	1.92	2.41	1.23	6.88	11.0	4.98	1.82
		8		9.515	7.47	0.247	34.5	67.1	54.6	14.3	1.90	2.40	1.23	7.75	12.3	5.47	1.85
		10		11.66	9.15	0.246	41.1	84.3	64.9	17.3	1.88	2.36	1.22	9.39	14.6	6.36	1.93
7	70	4	8	5.570	4.37	0.275	26.4	45.7	41.8	11.0	2.18	2.74	1.40	5.14	8.44	4.17	1.86
		5		6.876	5.40	0.275	32.2	57.2	51.1	13.3	2.16	2.73	1.39	6.32	10.3	4.95	1.91
		6		8.160	6.41	0.275	37.8	68.7	59.9	15.6	2.15	2.71	1.38	7.48	12.1	5.67	1.95
		7		9.424	7.40	0.275	43.1	80.3	68.4	17.8	2.14	2.69	1.38	8.59	13.8	6.34	1.99
		8		10.67	8.37	0.274	48.2	91.9	76.4	20.0	2.12	2.68	1.37	9.68	15.4	6.98	2.03

续表

型号	截面尺寸（mm）			截面面积（cm^2）	理论质量（kg/m）	外表面积（m^2/m）	惯性矩（cm^4）				惯性半径（cm）			截面模数（cm^3）			重心距离（cm）
	b	d	r				I_x	I_{x1}	I_{x0}	I_{y0}	i_x	i_{x0}	i_{y0}	W_x	W_{x0}	W_{y0}	Z_0
7.5	75	5	9	7.412	5.82	0.295	40.0	70.6	63.3	16.6	2.33	2.92	1.50	7.32	11.9	5.77	2.04
		6		8.797	6.91	0.294	47.0	84.6	74.4	19.5	2.31	2.90	1.49	8.64	14.0	6.67	2.07
		7		10.16	7.98	0.294	53.6	98.7	85.0	22.2	2.30	2.89	1.48	9.93	16.0	7.44	2.11
		8		11.50	9.03	0.294	60.0	113	95.1	24.9	2.28	2.88	1.47	11.2	17.9	8.19	2.15
		9		12.83	10.1	0.294	66.1	127	105	27.5	2.27	2.86	1.46	12.4	19.8	8.89	2.18
		10		14.13	11.1	0.293	72.0	142	114	30.1	2.26	2.84	1.46	13.6	21.5	9.56	2.22
8	80	5		7.912	6.21	0.315	48.8	85.4	77.3	20.3	2.48	3.13	1.60	8.34	13.7	6.66	2.15
		6		9.397	7.38	0.314	57.4	103	91.0	23.7	2.47	3.11	1.59	9.87	16.1	7.65	2.19
		7		10.86	8.53	0.314	65.6	120	104	27.1	2.46	3.10	1.58	11.4	18.4	8.58	2.23
		8		12.30	9.66	0.314	73.5	137	117	30.4	2.44	3.08	1.57	12.8	20.6	9.46	2.27
		9		13.73	10.8	0.314	81.1	154	129	33.6	2.43	3.06	1.56	14.3	22.7	10.3	2.31
		10		15.13	11.9	0.313	88.4	172	140	36.8	2.42	3.04	1.56	15.6	24.8	11.1	2.35
9	90	6	10	10.64	8.35	0.354	82.8	146	131	34.3	2.79	3.51	1.80	12.6	20.6	9.95	2.44
		7		12.30	9.66	0.354	94.8	170	150	39.2	2.78	3.50	1.78	14.5	23.6	11.2	2.48
		8		13.94	10.9	0.353	106	195	169	44.0	2.76	3.48	1.78	16.4	26.6	12.4	2.52
		9		15.57	12.2	0.353	118	219	187	48.7	2.75	3.46	1.77	18.3	29.4	13.5	2.56
		10		17.17	13.5	0.353	129	244	204	53.3	2.74	3.45	1.76	20.1	32.0	14.5	2.59
		12		20.31	15.9	0.352	149	294	236	62.2	2.71	3.41	1.75	23.6	37.1	16.5	2.67
10	100	6	12	11.93	9.37	0.393	115	200	182	47.9	3.10	3.90	2.00	15.7	25.7	12.7	2.67
		7		13.80	10.8	0.393	132	234	209	54.7	3.09	3.89	1.99	18.1	29.6	14.3	2.71
		8		15.64	12.3	0.393	148	267	235	61.4	3.08	3.88	1.98	20.5	33.2	15.8	2.76
		9		17.46	13.7	0.392	164	300	260	68.0	3.07	3.86	1.97	22.8	36.8	17.2	2.80
		10		19.26	15.1	0.392	180	334	285	74.4	3.05	3.84	1.96	25.1	40.3	18.5	2.84
		12		22.80	17.9	0.391	209	402	331	86.8	3.03	3.81	1.95	29.5	46.8	21.1	2.91
		14		26.26	20.6	0.391	237	471	374	99.0	3.00	3.77	1.94	33.7	52.9	23.4	2.99
		16		29.63	23.3	0.390	263	540	414	111	2.98	3.74	1.94	37.8	58.6	25.6	3.06
11	110	7		15.20	11.9	0.433	177	311	281	73.4	3.41	4.30	2.20	22.1	36.1	17.5	2.96
		8		17.24	13.5	0.433	199	355	316	82.4	3.40	4.28	2.19	25.0	40.7	19.4	3.01
		10		21.26	16.7	0.432	242	445	384	100	3.38	4.25	2.17	30.6	49.4	22.9	3.09
		12		25.20	19.8	0.431	283	535	448	117	3.35	4.22	2.15	36.1	57.6	26.2	3.16
		14		29.06	22.8	0.431	321	625	508	133	3.32	4.18	2.14	41.3	65.3	29.1	3.24

续表

型号	截面尺寸（mm）			截面面积（cm^2）	理论质量（kg/m）	外表面积（m^2/m）	惯性矩（cm^4）				惯性半径（cm）			截面模数（cm^3）			重心距离（cm）
	b	d	r				I_x	I_{x1}	I_{x0}	I_{y0}	i_x	i_{x0}	i_{y0}	W_x	W_{x0}	W_{y0}	Z_0
12.5	125	8	14	19.75	15.5	0.492	297	521	471	123	3.88	4.88	2.50	32.5	53.3	25.9	3.37
		10		24.37	19.1	0.491	362	652	574	149	3.385	4.85	2.48	40.0	64.9	30.6	3.45
		12		28.91	22.7	0.491	423	783	671	175	3.83	4.82	2.46	41.2	76.0	35.0	3.53
		14		33.37	26.2	0.490	482	916	764	200	3.80	4.78	2.45	54.2	86.4	39.1	3.61
		16		37.74	29.6	0.489	537	1050	851	224	3.77	4.75	2.43	60.9	96.3	43.0	3.68
14	140	10		27.37	21.5	0.551	515	915	817	212	4.34	5.46	2.78	50.6	82.6	39.2	3.82
		12		32.51	25.5	0.551	604	1100	959	249	4.31	5.43	2.76	59.8	96.9	45.0	3.90
		14		37.57	29.5	0.550	689	1280	1090	284	4.28	5.40	2.75	68.8	110	50.5	3.98
		16		42.54	33.4	0.549	770	1470	1220	319	4.26	5.36	2.74	77.5	123	55.6	4.06
15	150	8		23.75	18.6	0.592	521	900	827	215	4.69	5.90	3.01	47.4	78.0	38.1	3.99
		10		29.37	23.1	0.591	638	1130	1010	262	4.66	5.87	2.99	58.4	95.5	45.5	4.08
		12		34.91	27.4	0.591	749	1350	1190	308	4.63	5.84	2.97	69.0	112	52.4	4.15
		14		40.37	31.7	0.590	856	1580	1360	352	4.60	5.80	2.95	79.5	128	58.8	4.23
		15		43.06	33.8	0.590	907	1690	1440	374	4.59	5.78	2.95	84.6	136	61.9	4.27
		16		45.74	35.9	0.589	958	1810	1520	395	4.58	5.77	2.94	89.6	143	64.9	4.31
16	160	10	16	31.50	24.7	0.630	780	1370	1240	322	4.98	6.27	3.20	66.7	109	52.8	4.31
		12		37.44	29.4	0.630	917	1640	1460	377	4.95	6.24	3.18	79.0	129	60.7	4.39
		14		43.30	34.0	0.629	1050	1910	1670	432	4.92	6.20	3.16	91.0	147	68.2	4.47
		16		49.07	38.5	0.629	1180	2190	1870	485	4.89	6.17	3.14	103	165	75.3	4.55
18	180	12		42.24	33.2	0.710	1320	2330	2100	543	5.59	7.05	3.58	101	165	78.4	4.89
		14		48.90	38.4	0.709	1510	2720	2410	622	5.56	7.02	3.56	116	189	88.4	4.97
		16		55.47	43.5	0.709	1700	3120	2700	699	5.54	6.98	3.55	131	212	97.8	5.05
		18		61.96	48.6	0.708	1880	3500	2990	762	5.50	6.94	3.51	146	235	105	5.13
20	200	14	18	54.64	42.9	0.788	2100	3730	3340	864	6.20	7.82	3.98	145	236	112	5.46
		16		62.01	48.7	0.788	2370	4270	3760	971	6.18	7.79	3.96	164	266	124	5.54
		18		69.30	54.4	0.787	2620	4810	4160	1080	6.15	7.75	3.94	182	294	136	5.62
		20		76.51	60.1	0.787	2870	5350	4550	1180	6.12	7.72	3.93	200	322	147	5.69
		24		90.66	71.2	0.785	3340	6460	5290	1380	6.07	7.64	3.90	236	374	167	5.87

续表

型号	截面尺寸（mm）			截面面积（cm^2）	理论质量（kg/m）	外表面积（m^2/m）	惯性矩（cm^4）				惯性半径（cm）			截面模数（cm^3）			重心距离（cm）
	b	d	r				I_x	I_{x1}	I_{x0}	I_{y0}	i_x	i_{x0}	i_{y0}	W_x	W_{x0}	W_{y0}	Z_0
22	220	16	21	68.67	53.9	0.866	3190	5680	5060	1310	6.81	8.59	4.37	200	326	154	6.03
		18		76.75	60.3	0.866	3540	6400	5620	1450	6.79	8.55	4.35	223	361	168	6.11
		20		84.76	66.5	0.865	3870	7110	6150	1590	6.76	8.52	4.34	245	395	182	6.18
		22		92.68	72.8	0.865	4200	7830	6670	1730	6.73	8.48	4.32	267	429	195	6.26
		24		100.5	78.9	0.864	4520	8550	7170	1870	6.71	8.45	4.31	289	461	208	6.33
		26		108.3	85.0	0.864	4830	9280	7690	2000	6.68	8.41	4.30	310	492	221	6.41
25	250	18	24	87.84	69.0	0.985	5270	9380	8370	2170	7.75	9.76	4.97	290	473	224	6.84
		20		97.05	76.2	0.984	5780	10400	9180	2380	7.72	9.73	4.95	320	519	243	6.92
		22		106.2	83.3	0.983	6280	11500	9970	2580	7.69	9.69	7.93	349	564	261	7.00
		24		115.2	90.4	0.983	6770	12500	10700	2790	7.67	9.66	4.92	378	608	278	7.07
		26		124.2	97.5	0.982	7240	13600	11500	2980	7.64	9.62	4.90	406	650	295	7.15
		28		133.0	104	0.982	7700	14600	12200	3180	7.61	9.58	4.89	433	691	311	7.22
		30		141.8	111	0.981	8160	15700	12900	3380	7.58	9.55	4.88	461	731	327	7.30
		32		150.5	118	0.981	8600	16800	13600	3570	7.56	9.51	4.87	488	770	342	7.37
		35		163.4	128	0.980	9240	18400	14600	3850	7.52	9.46	4.86	527	827	364	7.48

注 截面图中的 $r_1=1/3d$ 及表中 r 的数据用于孔型设计，不做交货条件。

表 F-2 角钢尺寸、外形允许偏差 mm

项目		允许偏差		图示
		等边角钢	不等边角钢	
边宽度（B，b）	边宽度[a]≤56	±0.8	±0.8	
	>56～90	±1.2	±1.5	
	>90～140	±1.8	±2.0	
	>140～200	±2.5	±2.5	
	>200	±3.5	±3.5	
边厚度（d）	边宽度[a]≤56	±0.4		
	>56～90	±0.6		
	>90～140	±0.7		
	>140～200	±1.0		
	>200	±1.4		
顶端直角		$\alpha \leqslant 50'$		
弯曲度		每米弯曲度≤3mm 总弯曲度≤总长度的 0.3%		适用于上下、左右大弯曲

[a] 不等边角钢按长边宽度 B。

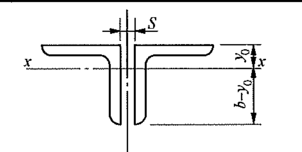
表 F-3　　大规格等边角钢截面尺寸、截面面积、理论质量及截面特性

型号	截面尺寸（mm）			截面面积（cm^2）	理论质量（kg/m）	外表面积（m^2/m）	惯性矩（cm^4）				惯性半径（cm）			截面模量（cm^3）			重心（cm）
	b	d	r				I_x	I_{x1}	I_{x0}	I_{y0}	i_x	i_{x0}	i_{y0}	W_x	W_{x0}	W_{y0}	Z_0
28	280	20	26	109.260	85.769	1.103	8229.11	14639.69	13076.07	3382.15	8.68	10.94	5.56	404.57	660.44	312.22	7.66
	280	22		119.580	93.870	1.103	8949.56	16111.36	14222.00	3677.13	8.65	10.91	5.55	441.71	718.32	335.98	7.74
	280	24		129.816	101.906	1.102	9654.05	17585.81	15340.47	3967.64	8.62	10.87	5.53	478.32	774.81	358.92	7.82
	280	26		139.968	109.875	1.101	10324.96	19063.33	16431.92	4254.00	8.60	10.84	5.51	514.40	829.94	381.09	7.89
	280	28		150.037	117.779	1.101	11016.67	20544.20	17496.83	4536.52	8.57	10.80	5.50	549.97	883.72	402.55	7.97
	280	30		160.022	125.617	1.100	11675.57	22028.70	18535.65	4815.49	8.54	10.76	5.49	585.05	936.19	423.33	8.04
	280	32		169.922	133.389	1.100	12320.02	23517.08	19548.83	5091.22	8.51	10.73	5.47	619.64	987.36	443.49	8.12
	280	35		184.617	144.924	1.099	13260.42	25757.46	21021.50	5499.35	8.48	10.67	5.46	670.65	1061.75	472.64	8.23
30	300	20	28	117.492	92.231	1.182	10199.99	18001.41	16204.62	4195.35	9.32	11.74	5.98	466.79	763.89	364.06	8.15
	300	22		128.612	100.960	1.182	11100.12	19809.35	17638.07	4562.18	9.29	11.71	5.96	509.86	831.47	392.02	8.23
	300	24		139.648	109.624	1.181	11981.60	21620.22	19039.58	4923.63	9.26	11.68	5.94	552.35	897.53	419.06	8.31
	300	26		150.600	118.221	1.181	12844.84	23434.35	20409.66	5280.02	9.24	11.64	5.92	594.27	962.12	445.24	8.39
	300	28		161.469	126.753	1.180	13690.26	25252.05	21748.81	5631.70	9.21	11.61	5.91	635.63	1025.25	470.60	8.46
	300	30		172.253	135.219	1.179	14518.26	27073.63	23057.52	5978.99	9.18	11.57	5.89	676.45	1086.94	495.20	8.54
	300	32		182.954	143.619	1.179	15329.25	28899.38	24336.28	6322.22	9.15	11.53	5.88	716.73	1147.22	519.08	8.61
	300	35		198.848	156.096	1.178	16514.72	31646.39	26199.31	6830.12	9.11	11.48	5.86	776.19	1235.05	553.64	8.72
32	320	22	28	137.412	107.868	1.262	13563.78	24032.08	21561.66	5565.91	9.94	12.53	6.36	582.84	952.90	450.92	8.73
	320	24		149.248	117.160	1.261	14650.10	26226.90	23290.36	6009.84	9.91	12.49	6.35	631.67	1029.30	482.51	8.81
	320	26		161.000	126.385	1.261	15715.30	28425.14	24982.88	6447.73	9.88	12.46	6.33	679.87	1104.10	513.14	8.88
	320	28		172.669	135.545	1.260	16759.84	30627.13	26639.74	6879.93	9.85	12.42	6.31	727.48	1177.32	542.85	8.96
	320	30		184.253	144.639	1.259	17784.15	32833.21	28261.48	7306.81	9.82	12.38	6.30	774.49	1248.99	571.70	9.04
	320	32		195.754	153.667	1.259	18788.67	35043.71	29848.62	7728.71	9.80	12.35	6.28	820.91	1319.14	599.73	9.11
	320	35		212.848	167.086	1.258	20259.29	38368.40	32165.60	8352.97	9.76	12.29	6.26	889.50	1421.53	640.34	9.22
36	360	24	30	168.697	132.427	1.420	21130.77	37321.52	33601.35	8660.20	11.19	14.11	7.16	806.42	1319.99	625.08	9.80
	360	26		182.049	122.908	1.420	22689.66	40444.54	36082.96	9296.36	11.16	14.08	7.15	868.52	1417.47	665.63	9.88
	360	28		195.318	153.324	1.419	24221.57	43571.66	38518.48	9924.66	11.14	14.04	7.13	929.93	1513.15	705.07	9.95
	360	30		208.502	163.674	1.419	25727.01	46703.27	40908.50	10545.52	11.11	14.01	7.11	990.65	1607.04	743.44	10.03
	360	32		221.603	173.958	1.418	27206.47	49839.77	43253.61	11159.33	11.08	13.97	7.10	1050.69	1699.16	780.79	10.11
	360	35		241.097	189.261	1.417	29378.04	54554.49	46688.39	12067.69	11.04	13.92	7.07	1139.52	1834.09	835.04	10.22

F.1.2　等边角钢组合的 T 形截面特征

等边角钢组合的 T 形截面特征见表 F-4。

表 F-4　　　　等边角钢组合的 T 形截面特性表



I—截面惯性矩；r—回转半径；$W_{max}=\dfrac{I}{y_0}$；$W_{min}=\dfrac{I}{b-y_0}$

角钢尺寸 肢宽 b× 厚度δ	两个角钢的截面面积	两个角钢的质量	x–x I	x–x W_{max}	x–x W_{min}	x–x r	x–x y_0	对于 y–y 轴的回转半径 r，两个角钢背的距离 S（mm）0	4	6	8	10	12	14	16	18	20
(mm)	(cm²)	(kg/m)	(cm⁴)	(cm³)	(cm³)	(cm)	(cm)	(cm)									
20×3	2.264	1.778	0.80	1.33	0.57	0.59	0.60	0.84	1.00	1.08	1.16	1.25	1.34	1.43	1.52	1.61	1.71
4	2.918	2.290	1.00	1.56	0.74	0.58	0.64	0.87	1.02	1.11	1.19	1.28	1.37	1.46	1.55	1.65	1.74
25×3	2.864	2.248	1.64	2.25	0.93	0.76	0.73	1.05	1.20	1.28	1.36	1.44	1.53	1.62	1.71	1.80	1.89
4	3.718	2.918	2.06	2.71	1.18	0.74	0.76	1.06	1.21	1.30	1.38	1.46	1.55	1.64	1.73	1.82	1.91
30×3	3.498	2.746	2.92	3.44	1.36	0.91	0.85	1.25	1.39	1.47	1.55	1.63	1.71	1.80	1.89	1.97	2.06
4	4.552	3.572	3.68	4.13	1.74	0.90	0.89	1.27	1.41	1.49	1.57	1.66	1.74	1.83	1.91	2.00	2.09
36×3	4.218	3.312	5.16	5.16	1.98	1.11	1.00	1.49	1.63	1.71	1.78	1.86	1.95	2.03	2.11	2.20	2.29
4	5.512	4.326	6.58	6.33	2.57	1.09	1.04	1.51	1.65	1.73	1.81	1.89	1.97	2.05	2.14	2.23	2.31
5	6.764	5.308	7.90	7.38	3.12	1.08	1.07	1.52	1.67	1.74	1.82	1.91	1.99	2.07	2.16	2.25	2.34
40×3	4.718	3.704	7.18	6.59	2.47	1.23	1.09	1.65	1.78	1.86	1.93	2.01	2.09	2.17	2.26	2.34	2.43
4	6.172	4.844	9.20	8.14	3.21	1.22	1.13	1.66	1.81	1.88	1.96	2.04	2.12	2.20	2.28	2.37	2.46
5	7.582	5.952	11.1	9.49	3.92	1.21	1.17	1.68	1.83	1.90	1.98	2.06	2.14	2.23	2.31	2.40	2.48
45×3	5.318	4.176	10.3	8.44	3.14	1.40	1.22	1.85	1.99	2.06	2.14	2.21	2.29	2.37	2.45	2.54	2.62
4	6.972	5.472	13.3	10.6	4.10	1.38	1.26	1.87	2.01	2.08	2.16	2.24	2.32	2.40	2.48	2.56	2.65
5	8.584	6.738	16.1	12.4	5.03	1.37	1.30	1.89	2.03	2.11	2.18	2.26	2.34	2.42	2.51	2.59	2.68
6	10.152	7.970	18.7	14.1	5.90	1.36	1.33	1.90	2.04	2.12	2.20	2.28	2.36	2.44	2.52	2.61	2.70
50×3	5.942	4.664	14.4	10.7	3.93	1.55	1.34	2.05	2.19	2.26	2.33	2.41	2.49	2.56	2.65	2.73	2.81
4	7.794	6.118	18.5	13.4	5.11	1.54	1.38	2.07	2.21	2.28	2.35	2.43	2.51	2.59	2.67	2.75	2.84
5	9.606	7.540	22.4	15.8	6.26	1.53	1.42	2.09	2.23	2.30	2.38	2.45	2.53	2.61	2.69	2.78	2.86
6	11.376	8.930	26.1	17.9	7.37	1.52	1.46	2.10	2.25	2.32	2.40	2.48	2.56	2.64	2.72	2.80	2.89
56×3	6.686	5.248	20.4	13.8	4.95	1.75	1.48	2.29	2.42	2.49	2.57	2.64	2.72	2.79	2.87	2.95	3.03
4	8.780	6.892	26.4	17.3	6.49	1.73	1.53	2.31	2.45	2.52	2.59	2.67	2.75	2.82	2.90	2.98	3.07
5	10.830	8.502	32.0	20.4	7.94	1.72	1.57	2.33	2.47	2.54	2.62	2.69	2.77	2.85	2.93	3.01	3.09
8	16.734	13.136	47.3	28.2	12.1	1.68	1.68	2.38	2.52	2.60	2.67	2.75	2.83	2.91	3.00	3.08	3.16
63×4	9.956	7.814	38.1	22.4	8.28	1.96	1.70	2.59	2.73	2.80	2.87	2.94	3.02	3.10	3.17	3.25	3.33
5	12.286	9.644	46.3	26.6	10.2	1.94	1.74	2.61	2.75	2.82	2.89	2.96	3.04	3.12	3.20	3.28	3.36
6	14.576	11.442	54.2	30.4	12.0	1.93	1.78	2.62	2.76	2.84	2.91	2.99	3.06	3.14	3.22	3.30	3.38

续表

角钢尺寸	两个角钢的截面面积	两个角钢的质量	x–x					对于 y–y 轴的回转半径 r									
肢宽 $b\times$ 厚度 δ			I	W_{max}	W_{min}	r	y_0	两个角钢背的距离 S（mm）									
								0	4	6	8	10	12	14	16	18	20
（mm）	（cm^2）	（kg/m）	（cm^4）	（cm^3）	（cm^3）	（cm）	（cm）	（cm）									
63×8	19.030	14.938	68.9	37.2	15.5	1.90	1.85	2.65	2.80	2.87	2.95	3.02	3.10	3.18	3.26	3.34	3.43
10	23.314	18.302	82.2	42.6	18.8	1.88	1.93	2.69	2.84	2.92	2.99	3.07	3.15	3.23	3.31	3.40	3.48
70×4	11.140	8.744	52.8	28.4	10.3	2.18	1.86	2.86	3.00	3.07	3.14	3.21	3.28	3.36	3.44	3.52	3.59
5	13.750	10.794	64.4	33.7	12.7	2.16	1.91	2.89	3.02	3.09	3.17	3.24	3.31	3.39	3.47	3.55	3.63
6	16.320	12.812	75.5	38.7	15.0	2.15	1.95	2.90	3.04	3.11	3.19	3.26	3.34	3.41	3.49	3.57	3.65
7	18.848	14.796	86.2	43.3	17.2	2 14	1.99	2.92	3.06	3.13	3.21	3.28	3.36	3.44	3.52	3.60	3.68
8	21.334	16.746	96.3	47.4	19.4	2.12	2.03	2.94	3.08	3.15	3.23	3.30	3.38	3.46	3.54	3.62	3.70
75×5	14.824	11.636	79.9	39.4	14.6	2.32	2.03	3.08	3.22	3.29	3.36	3.43	3.50	3.58	3.66	3.73	3.81
6	17.594	13.810	93.9	45.4	17.3	2.31	2.07	3.10	3.24	3.31	3.38	3.46	3.53	3.61	3.68	3.76	3.84
7	20.320	15.952	107	50.7	19.9	2.30	2.11	3.12	3.26	3.33	3.40	3.48	3.55	3.63	3.71	3.79	3.87
8	23.006	18.060	120	55.8	22.4	2.28	2.15	3.14	3.28	3.35	3.42	3.50	3.57	3.65	3.73	3.81	3.89
10	28.252	22.178	144	64.9	27.3	2.26	2.22	3.17	3.31	3.38	3.46	3.53	3.61	3.69	3.77	3.85	3.93
80×5	15.824	12.422	97.6	45.4	16.7	2.48	2.15	3.28	3.42	3.49	3.56	3.63	3.71	3.78	3.86	3.93	4.01
6	18.794	14.752	115	52.5	19.8	2.47	2.19	3.30	3.44	3.51	3.58	3.65	3.73	3.80	3.88	3.96	4.03
7	21.720	17.050	131	58.7	22.7	2.46	2.23	3.32	3.46	3.53	3.60	3.67	3.75	3.82	3.90	3.98	4.06
8	24.606	19.316	147	64.8	25.7	2.44	2.27	3.34	3.47	3.55	3.62	3.69	3.77	3.85	3.92	4.00	4.08
10	30.252	23.748	177	75.3	31.3	2.42	2.35	3.37	3.51	3.59	3.66	3.74	3.81	3.89	3.97	4.05	4.13
90×6	21.274	16.700	166	68.0	25.3	2.79	2.44	3.71	3.84	3.91	3.98	4.05	4.13	4.20	4.28	4.35	4.43
7	24.602	19.312	190	76.6	29.1	2.78	2.48	3.72	3.86	3.93	4.00	4.07	4.15	4.22	4.30	4.37	4.45
8	28.888	21.892	213	84.5	32.9	2.76	2.52	3.74	3.88	3.95	4.02	4.09	4.17	4.24	4.32	4.40	4.48
10	34.334	26.952	257	99.2	40.1	2.74	2.59	3.77	3.91	3.98	4.05	4.13	4.20	4.28	4.36	4.44	4.51
12	40.612	31.880	298	112	47.1	2.71	2.67	3.80	3.95	4.02	4.10	4 17	4.25	4.32	4.40	4.48	4.56
100×6	23.864	18.732	230	86.1	31.4	3.10	2.67	4.09	4.23	4.30	4.37	4.44	4.51	4.58	4.66	4.73	4.81
7	27.592	21.660	264	97.4	36.2	3.09	2.71	4.11	4.25	4.31	4.39	4.46	4.53	4.60	4.68	4.75	4.83
8	31.276	24.552	296	107	40.9	3.08	2.76	4.13	4.27	4.34	4.41	4.48	4.56	4.63	4.71	4.78	4.86
10	38.522	30.240	359	126	50.1	3.05	2.84	4.17	4.31	4.38	4.45	4.52	4.60	4.67	4.75	4.83	4.91
12	45.600	35.796	418	144	59.0	3.03	2.91	4.20	4.34	4.41	4.49	4.56	4.63	4.71	4.79	4.87	4.94
14	52.512	41.222	473	158	67.5	3.00	2.99	4.24	4.38	4.45	4.53	4.60	4.68	4.76	4.83	4.91	4.99
16	59.254	46.514	525	172	75.6	2.98	3.06	4.27	4.41	4.49	4.56	4.64	4.72	4.80	4.87	4.95	5.03
110×7	30.392	23 856	354	120	44.0	3.41	2.96	4.52	4.65	4.72	4.79	4.86	4.93	5.01	5.08	5.15	5.23
8	34.476	27.064	399	133	49.9	3.40	3.01	4.54	4.68	4.75	4.82	4.89	4.96	5.03	5.11	5.18	5.26
10	42.522	33.380	484	157	61.2	3.38	3.09	4.58	4.71	4.78	4.86	4.93	5.00	5.07	5.15	5.23	5.30
12	50.400	39.564	565	179	72.1	3.35	3.16	4.60	4.74	4.81	4.89	4.96	5.03	5.11	5.19	5.26	5.34
14	58.112	45.618	641	198	82.6	3.32	3.24	4.64	4.78	4.85	4.93	5.00	5.08	5.15	5.23	5.31	5.39

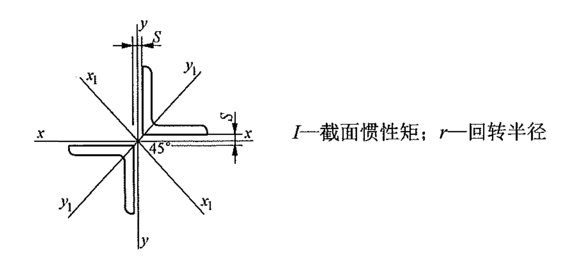
续表

角钢尺寸	两个角钢的截面面积	两个角钢的质量	x-x					对于 y-y 轴的回转半径 r									
肢宽 b× 厚度δ			I	W_{max}	W_{min}	r	y_0	两个角钢背的距离 S（mm）									
								0	4	6	8	10	12	14	16	18	20
（mm）	（cm²）	（kg/m）	（cm⁴）	（cm³）	（cm³）	（cm）	（cm）	（cm）									
125×8	39.500	31.008	594	176	65.1	3.88	3.37	5.14	5.27	5.34	5.41	5.48	5.55	5.62	5.69	5.77	5.84
10	48.746	38.266	723	210	79.9	3.85	3.45	5 17	5.31	5.38	5.45	5.52	5.59	5.66	5.74	5.81	5.89
12	57.824	45.392	846	240	94.3	3.83	3.53	5.21	5.34	5.41	5.48	5.56	5.63	5.70	5.78	5.85	5.93
14	66.734	52.386	963	267	108	3.80	3.61	5.24	5.38	5.45	5.52	5.60	5.67	5.75	5.82	5.90	5.97
140×10	54.746	42.976	1029	269	101	4.34	3.82	5.78	5.91	5.98	6.05	6.12	6.19	6.26	6.34	6.41	6.48
12	65.024	51.044	1207	309	120	4.31	3.90	5.81	5.95	6.02	6.09	6.16	6.23	6.30	6.38	6.45	6.33
14	75.134	58.980	1378	346	138	4.28	3.98	5.85	5.98	6.05	6.13	6.20	6.27	6.34	6.42	6.49	6.57
16	85.078	66.786	1540	379	155	4.26	4.06	5.88	6.02	6.09	6.16	6.24	6.31	6.38	6.46	6.54	6.61
160×10	63.004	49.458	1559	362	133	4.98	4.31	6.58	6.71	6.78	6.85	6.92	6.99	7.06	7.13	7.20	7.28
12	74.882	58.782	1833	418	158	4.95	4.39	6.61	6.75	6.82	6.89	6.96	7.03	7.10	7.17	7.24	7.32
14	86.592	67.974	2097	469	182	4.92	4.47	6.65	6.78	6.85	6.92	6.99	7.07	7.14	7.21	7.28	7.36
16	98.134	77.036	2350	516	205	4.89	4.55	6.68	6.82	6.89	6.96	7.03	7.10	7.18	7.25	7.32	7.40
180×12	84.482	66.318	2643	540	202	5.59	4.89	7.43	7.56	7.63	7.70	7.77	7.84	7.91	7.98	8.05	8.12
14	97.792	76.766	3029	609	232	5.56	4.97	7.46	7.60	7.66	7.73	7 80	7.87	7.94	8.02	8.09	8.16
16	110.934	87.084	3402	674	263	5.54	5.05	7.49	7.63	7.70	7 77	7.84	7.91	7.98	8.06	8.13	8.20
18	123.910	97.268	3750	731	291	5.50	5.13	7.52	7.66	7.73	7.80	7.87	7.94	8.02	8.09	8.16	8.24
200×14	109.284	85.788	4207	771	289	6.20	5.46	8.26	8.40	8.47	8.53	8.60	8.67	8.74	8.81	8.89	8.96
16	124.026	97.360	4732	854	327	6.18	5.54	8.30	8.43	8.50	8.57	8.64	8.71	8.78	8.85	8.92	9.00
18	138.602	108.802	5241	933	364	6.15	5.62	8.33	8.47	8.54	8.61	8.68	8.75	8.82	8.89	8.96	9.04
20	153.010	120.112	5735	1008	401	6.12	5.69	8.36	8.50	8.56	8.64	8.71	8.78	8.85	8.92	8.99	9.07
24	181.322	142.336	6677	1137	473	6.07	5.87	8.44	8.58	8.65	8.73	8.80	8.87	8.94	9.02	9.09	9.17

F.1.3 等边角钢组合的十字形截面特征

等边角钢组合的十字形截面特征见表 F-5。

表 F-5 等边角钢组合的十字形截面特性表



I—截面惯性矩；r—回转半径

续表

角钢尺寸	两个角钢的截面面积	两个角钢的质量	x_1–x_1										y_1–y_1	
			I					r						
肢宽 $b\times$ 厚度 δ			两个角钢背的距离 S（mm）										I	r
			0	4	6	8	10	0	4	6	8	10		
（mm）	（cm^2）	（kg/m）	（cm^4）					（cm）					（cm^4）	（cm）
20×3	2.264	1.778	1.98	3.25	4.02	4.89	5.84	0.935	1.20	1.33	1.47	1.61	1.26	0.747
4	2.918	2.290	2.81	4.54	5.57	6.73	8.00	0.982	1.25	1.38	1.52	1.66	1.56	0.730
25×3	2.864	2.248	3.71	5.60	6.72	7.95	9.30	1.14	1.40	1.53	1.67	1.80	2.59	0.950
4	3.718	2.918	5.21	7.78	9.28	10.9	12.7	1.18	1.45	1.58	1.72	1.85	3.24	0.933
30×3	3.498	2.746	6.24	8.89	10.4	12.1	13.9	1..34	1.59	1.73	1.86	1.99	4.61	1.15
4	4.552	3.572	8.70	12.3	14.4	16.6	19.0	1.38	1.64	1.78	1.91	2.05	5.83	1.13
36×3	4.218	3.312	10.5	14.2	16.3	18.6	21.0	1.58	1.84	1.97	2.10	2.23	8.18	1.39
4	5.512	4.326	14.6	19.6	22.4	25.5	28.7	1.63	1.88	2.02	2.15	2.28	10.4	1.38
5	6.764	5.308	18.9	25.2	28.8	32.7	36.8	1.67	1.93	2.06	2.20	2.33	12.5	1.36
40×3	4.718	3.704	14.3	18.8	21.3	24.0	26.9	1.74	1.99	2.12	2.26	2.39	11.4	1.55
4	6.172	4.844	19.7	25.8	29.2	32.9	36.8	1.79	2.04	2.17	2.31	2.44	14.6	1.54
5	7.582	5.952	25.4	33.2	37.5	42.1	47.0	1.83	2.09	2.22	2.36	2.49	17.5	1.52
45×3	5.318	4.176	20.1	25.7	28.8	32.1	35.7	1.94	2.20	2.33	2.46	2.59	16.4	1.76
4	6.972	5.472	27.6	35.2	39.4	43.8	48.6	1.99	2.25	2.38	2.51	2.64	21.1	1.74
5	8.584	6.738	35.5	45.1	50.4	56.1	62.1	2.03	2.29	2.42	2.56	2.69	25.5	1.72
6	10.152	7.970	43.9	55.6	62.0	68.8	76.1	2.08	2.34	2.47	2.60	2.74	29.5	1.71
50×3	5.942	4.664	27.3	34.1	37.9	41.9	46.1	2.14	2.40	2.52	2.66	2.79	22.7	1.96
4	7.794	6.118	37.4	46.6	51.7	57.1	62.8	2.19	2.45	2.58	2.71	2.84	29.4	1.94
5	9.606	7.540	48.0	59.7	66.1	72.9	80.1	2.24	2.49	2.63	2.76	2.89	35.6	1.92
6	11.376	8.930	59.2	73.4	81.1	89.4	98.0	2.28	2.54	2.67	2.80	2.94	41.4	1.91
56×3	6.686	5.248	37.9	46.4	51.1	56.0	61.1	2.38	2.64	2.76	2.89	3.02	32.3	2.20
4	8.780	6.892	51.9	63.3	69.6	76.1	83.1	2.43	2.69	2.81	2.95	3.08	41.8	2.18
5	10.830	8.502	66.5	80.9	88.8	97.1	106	2.48	2.73	2.86	2.99	3.13	50.8	2.17
8	16.734	13.136	114	138	151	165	179	2.61	2.87	3.00	3.14	3.27	74.7	2.11
63×4	9.956	7.814	73.1	87.4	95.1	103	112	2.71	2.96	3.09	3.22	3.35	60.3	2.46
5	12.286	9.644	93.4	111	121	131	142	2.76	3.01	3.14	3.27	3.40	73.5	2.45
6	14.576	11.442	115	136	148	161	174	2.80	3.06	3.19	3.32	3.45	86.1	2.43
8	19.030	14.938	159	189	205	222	239	2.89	3.15	3.28	3.41	3.55	109	2.39
10	23.314	18.302	208	245	266	287	309	2.98	3.24	3.38	3.51	3.64	130	2.36

续表

角钢尺寸 肢宽 b×厚度δ	两个角钢的截面面积	两个角钢的质量	x_1-x_1 I，两个角钢背的距离 S（mm）					x_1-x_1 r，两个角钢背的距离 S（mm）					y_1-y_1	
			0	4	6	8	10	0	4	6	8	10	I	r
（mm）	（cm²）	（kg/m）	（cm⁴）					（cm）					（cm⁴）	（cm）
70×4	11.140	8.744	99.4	117	126	136	146	2.99	3.24	3.37	3.50	3.63	83.6	2.74
5	13.750	10.794	127	149	161	173	186	3.04	3.29	3.42	3.55	3.68	102	2.73
6	16.320	12.812	155	182	196	211	227	3.08	3.34	3.47	3.60	3.73	120	2.71
7	18.848	14.796	184	216	233	250	269	3.13	3.38	3.51	3.65	3.78	137	2.69
8	21.334	16.746	215	251	271	291	312	3.17	3.43	3.56	3.69	3.82	153	2.68
75×5	14.824	11.636	155	180	194	208	222	3.23	3.49	3.61	3.74	3.87	127	2.92
6	17.594	13.810	189	220	236	253	271	3.28	3.53	3.66	3.79	3.92	149	2.91
7	20.320	15.952	225	261	280	300	321	3.33	3.58	3.71	3.84	3.97	170	2.89
8	23.006	18.060	262	303	325	348	372	3.37	3.63	3.76	3.89	4.02	190	2.87
10	28.252	22.178	339	391	419	448	479	3.46	3.72	3.85	3.98	4.12	228	2.84
80×5	15.824	12.422	187	215	230	246	263	3.44	3.69	3.82	3.94	4.07	155	3.13
6	18.794	14.752	228	263	281	300	320	3.48	3.74	3.87	4.00	4.13	182	3.11
7	21.720	17.050	271	311	333	355	379	3.53	3.79	3.91	4.04	4.17	208	3.10
8	24.606	19.316	315	361	386	412	439	3.58	3.83	3.96	4.09	4.22	233	3.08
10	30.252	23.748	407	466	497	530	564	3.67	3.92	4.05	4.19	4.32	280	3.04
90×6	21.274	16.700	321	364	387	411	435	3.88	4.14	4.26	4.39	4.53	263	3.51
7	24.602	19.312	380	431	458	486	514	3.93	4.19	4.31	4.44	4.57	301	3.50
8	27.888	21.892	441	500	531	563	596	3.98	4.23	4.36	4.49	4.62	338	3.48
10	34.334	26.952	569	642	682	722	764	4.07	4.33	4.46	4.59	4.72	408	3.45
12	40.612	31.880	703	793	840	889	940	4.16	4.42	4.55	4.68	4.81	472	3.41

角钢尺寸 肢宽 b×厚度δ	两个角钢的截面面积	两个角钢的质量	x_1-x_1 I，两个角钢背的距离 S（mm）					x_1-x_1 r，两个角钢背的距离 S（mm）					y_1-y_1	
			10	12	14	16	18	10	12	14	16	18	I	r
（mm）	（cm²）	（kg/m）	（cm⁴）					（cm）					（cm⁴）	（cm）
100×6	23.864	18.732	576	607	638	671	704	4.91	5.04	5.17	5.30	5.43	364	3.91
7	27.592	21.660	680	716	753	791	831	4.96	5.09	5.22	5.36	5.49	418	3.89
8	31.276	24.552	786	828	870	914	959	5.01	5.14	5.27	5.41	5.54	470	3.88
10	38.522	30.240	1096	1059	1112	1168	1224	5.11	5.24	5.37	5.51	5.64	569	3.84
12	45.600	35.796	1236	1299	1364	1431	1499	5.21	5.34	5.47	5.60	5.73	662	3.81
14	52.512	41.222	1475	1549	1626	1704	1785	5.30	5.43	5.56	5.70	5.83	748	3.77
16	59.254	46.514	1723	1809	1897	1987	2079	5.39	5.52	5.66	5.79	5.92	828	3.74

续表

角钢尺寸	两个角钢的截面面积	两个角钢的质量	x_1-x_1										y_1-y_1	
			I					r						
			两个角钢背的距离 S（mm）											
肢宽 $b\times$ 厚度 δ			10	12	14	16	18	10	12	14	16	18	I	r
（mm）	（cm²）	（kg/m）	（cm⁴）					（cm）					（cm⁴）	（cm）
110×7	30.392	23.856	876	919	963	1008	1054	5.37	5.50	5.63	5.76	5.89	562	4.30
8	34.476	27.064	1012	1061	1112	1164	1217	5.42	5.55	5.68	5.81	5.94	633	4.28
10	42.522	33.380	1294	1355	1419	1484	1551	5.52	5.65	5.78	5.91	6.04	769	4.25
12	50.400	39.564	1586	1661	1738	1817	1898	5.61	5.74	5.87	6.00	6.14	896	4.22
14	58.112	45.618	1890	1978	2068	2161	2256	5.70	5.83	5.97	6.10	6.23	1016	4.18
125×8	39.500	31.008	1428	1490	1553	1619	1685	6.01	6.14	6.27	6.40	6.53	942	4.88
10	48.746	38.266	1821	1899	1979	2061	2145	6.11	6.24	6.37	6.50	6.63	1148	4.85
12	57.824	45.392	2228	2322	2419	2518	2619	6.21	6.34	6.47	6.60	6.73	1343	4.82
14	66.734	52.386	2650	2761	2874	2991	3110	6.30	6.43	6.56	6.69	6.83	1527	4.78
140×10	54.746	42.976	2472	2568	2666	2766	2868	6.72	6.85	6.98	7.11	7.24	1634	5.46
12	65.024	51.044	3020	3136	3254	3375	3499	6.81	6.94	7.07	7.20	7.34	1918	5.43
14	75.134	58.980	3586	3722	3861	4003	4148	6.91	7.04	7.17	7.30	7.43	2187	5.40
16	85.078	66.786	4169	4326	4486	4650	4817	7.00	7.13	7.26	7.39	7.52	2444	5.36
160×10	63.004	49.458	3562	3684	3809	3937	4067	7.52	7.65	7.78	7.90	8.03	2475	6.27
12	74.882	58.782	4343	4491	4642	4796	4953	7.62	7.74	7.87	8.00	8.13	2911	6.24
14	86.592	67.974	5147	5321	5498	5679	5863	7.71	7.84	7.97	8.10	8.23	3330	6.20
16	98.134	77.036	5974	6174	6379	6587	6799	7.80	7.93	8.06	8.19	8.32	3731	6.17

角钢尺寸	两个角钢的截面面积	两个角钢的质量	x_1-x_1										y_1-y_1	
			I					r						
			两个角钢背的距离 S（mm）											
肢宽 $b\times$ 厚度 δ			12	14	16	18	20	12	14	16	18	20	I	r
（mm）	（cm²）	（kg/m）	（cm⁴）					（cm）					（cm⁴）	（cm）
180×12	84.482	66.318	6184	6371	6562	6756	6954	8.56	8.68	8.81	8.94	9.07	4200	7.05
14	97.792	79.766	7317	7537	7760	7988	8220	8.65	8.78	8.91	9.04	9.17	4815	7.02
16	110.934	87.084	8479	8782	8989	9251	9517	8.74	8.87	9.00	9.13	9.26	5407	6.98
18	123.910	97.268	9671	9957	10248	10544	10845	8.83	8.96	9.09	9.22	9.36	5976	6.94
200×14	109.284	85.788	9761	10029	10300	10576	10856	9.45	9.58	9.71	9.84	9.97	6686	7.82
16	124.026	97.360	11299	11606	11918	12235	12557	9.54	9.67	9.80	9.93	10.1	7522	7.79
18	138.602	108.802	12872	13220	13573	13931	14296	9.64	9.77	9.90	10.0	10.2	8329	7.75
20	153.010	120.112	14482	14870	15265	15665	16072	9.73	9.86	9.99	10.1	10.2	9109	7.72
24	181.322	142.336	17811	18282	18760	19245	19738	9.91	10.0	10.2	10.3	10.4	10590	7.64

F.1.4　b 类截面轴心受压构件的稳定系数φ

b 类截面轴心受压构件的稳定系数φ见表 F-6。

表 F-6　　b 类截面轴心受压构件的稳定系数φ

$K\lambda\sqrt{\frac{f_y}{235}}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1.000	1.000	1.000	0.999	0.999	0.998	0.997	0.996	0.995	0.994
10	0.992	0.991	0.989	0.987	0.985	0.983	0.981	0.978	0.976	0.973
20	0.970	0.967	0.963	0.960	0.957	0.953	0.950	0.946	0.943	0.939
30	0.936	0.932	0.929	0.925	0.922	0.918	0.914	0.910	0.906	0.903
40	0.899	0.895	0.891	0.887	0.882	0.878	0.874	0.870	0.865	0.861
50	0.856	0.852	0.847	0.842	0.838	0.833	0.828	0.823	0.818	0.813
60	0.807	0.802	0.797	0.791	0.786	0.780	0.774	0.769	0.763	0.757
70	0.751	0.745	0.739	0.732	0.726	0.720	0.714	0.707	0.701	0.694
80	0.688	0.681	0.675	0.668	0.661	0.655	0.648	0.641	0.635	0.628
90	0.621	0.614	0.608	0.601	0.594	0.588	0.581	0.575	0.568	0.561
100	0.555	0.549	0.542	0.536	0.529	0.523	0.517	0.511	0.505	0.499
110	0.493	0.487	0.481	0.475	0.470	0.464	0.458	0.453	0.447	0.442
120	0.437	0.432	0.426	0.421	0.416	0.411	0.406	0.402	0.397	0.392
130	0.387	0.383	0.378	0.374	0.370	0.365	0.361	0.357	0.353	0.349
140	0.345	0.341	0.337	0.333	0.329	0.326	0.322	0.318	0.315	0.311
150	0.308	0.304	0.301	0.298	0.294	0.291	0.288	0.285	0.282	0.279
160	0.276	0.273	0.270	0.267	0.265	0.262	0.259	0.256	0.254	0.251
170	0.249	0.246	0.244	0.241	0.239	0.236	0.234	0.232	0.229	0.227
180	0.225	0.223	0.220	0.218	0.216	0.214	0.212	0.210	0.208	0.206
190	0.204	0.202	0.200	0.198	0.197	0.195	0.193	0.191	0.190	0.188
200	0.186	0.184	0.183	0.181	0.180	0.178	0.176	0.175	0.173	0.172
210	0.170	0.169	0.167	0.166	0.165	0.163	0.162	0.160	0.159	0.158
220	0.156	0.155	0.154	0.153	0.151	0.150	0.149	0.148	0.146	0.145
230	0.144	0.143	0.142	0.141	0.140	0.138	0.137	0.136	0.135	0.134
240	0.133	0.132	0.131	0.130	0.129	0.128	0.127	0.126	0.125	0.124
250	0.123									

F.1.5　热轧不等边角钢尺寸、外形、质量及允许偏差

GB/T 706—2016 适用于热轧不等边角钢，根据需要摘录如下。

F.1.5.1　尺寸及允许偏差

（1）截面尺寸及允许偏差。

1）不等边角钢的截面图示及标注符号如图 F-2 所示。

2）不等边角钢的尺寸、截面面积、理论质量及截面特性参数应符合表 F-7 的规定。

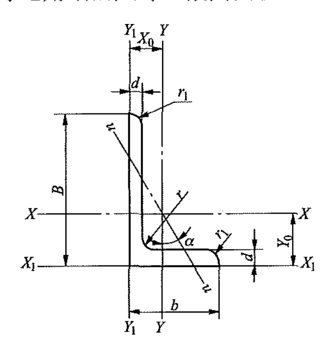


图 F-2　不等边角钢截面图

B—长边宽度；b—短边宽度；d—边厚度；r—内圆弧半径；r_1—边端圆弧半径；X_0—重心距离；Y_0—重心距离

3）截面尺寸允许偏差。不等边角钢宽度 B、b，边厚度δ尺寸允许偏差应符合表 F-8 的规定。

（2）长度及允许偏差。

1）角钢的通常长度为 4000～19000mm，其他型钢的通常长度为 5000～19000mm，根据需方要求也可供应其他长度产品。

2）角钢交货长度应在合同中注明，当型钢长度小于等于 8m 时其长度允许偏差为 $^{+50}_{0}$ mm，当型钢长度大于 8m 时其长度允许偏差为 $^{+80}_{0}$ mm。

F.1.5.2　质量及允许误差

（1）不等边角钢按理论质量或实际质量交货。

（2）不等边角钢计算理论质量时，钢的密度为 7.85g/cm^3。

（3）根据双方协议，不等边角钢每米质量允许偏差不得超过±5%。

F.1.5.3　包装、标记及质量证明书

型钢的包装、标记及质量证明书应符合 GB/T 2101 的规定。

表 F-7 不等边角钢截面尺寸、截面面积、理论质量及截面特性

型号	截面尺寸（mm）				截面面积（cm^2）	理论质量（kg/m）	外表面积（m^2/m）	惯性矩（cm^4）					惯性半径（cm）			截面模数（cm^3）			$\tan\alpha$	重心距离（cm）	
	B	b	d	r				I_x	I_{x1}	I_y	I_{y1}	I_u	i_x	i_y	i_u	W_x	W_y	W_z		X_0	Y_0
2.5/1.5	25	16	3	3.5	1.162	0.91	0.080	0.70	1.56	0.22	0.43	0.14	0.78	0.44	0.34	0.43	0.19	0.16	0.392	0.42	0.86
			4		1.499	1.18	0.079	0.88	2.09	0.27	0.59	0.17	0.77	0.43	0.34	0.55	0.24	0.20	0.381	0.46	0.90
3.2/2	32	30	3		1.492	1.17	0.102	1.53	3.27	0.46	0.82	0.28	1.01	0.55	0.43	0.72	0.30	0.25	0.382	0.49	1.08
			4		1.939	1.52	0.101	1.93	4.37	0.57	1.12	0.35	1.00	0.54	0.42	0.93	0.39	0.32	0.374	0.53	1.12
4/2.5	40	25	3	4	1.890	1.48	0.127	3.08	5.39	0.93	1.59	0.56	1.28	0.70	0.54	1.15	0.49	0.40	0.385	0.59	1.32
			4		2.467	1.94	0.127	3.93	8.53	1.18	2.14	0.71	1.36	0.69	0.54	1.49	0.63	0.52	0.381	0.63	1.37
4.5/2.8	45	28	3	5	2.149	1.69	0.143	4.45	9.10	1.34	2.23	0.80	1.44	0.79	0.61	1.47	0.62	0.51	0.383	0.64	1.47
			4		2.806	2.20	0.143	5.69	12.1	1.70	3.00	1.02	1.42	0.78	0.60	1.91	0.80	0.66	0.380	0.68	1.51
5/3.2	50	32	3	5.5	2.431	1.91	0.161	6.24	12.5	2.02	3.31	1.20	1.60	0.91	0.70	1.84	0.82	0.68	0.404	0.73	1.60
			4		3.177	2.49	0.160	8.02	16.7	2.58	4.45	1.53	1.59	0.90	0.69	2.39	1.06	0.87	0.402	0.77	1.65
5.6/3.6	56	36	3	6	2.743	2.15	0.181	8.88	17.5	2.92	4.7	1.73	1.80	1.03	0.79	2.32	1.05	0.87	0.408	0.80	1.78
			4		3.590	2.82	0.180	11.5	23.4	3.76	6.33	2.23	1.79	1.02	0.79	3.03	1.37	1.13	0.408	0.85	1.82
			5		4.415	3.47	0.180	13.9	29.3	4.49	7.94	2.67	1.77	1.01	0.78	3.71	1.65	1.36	0.404	0.88	1.87
6.3/4	63	40	4	7	4.058	3.19	0.202	16.5	33.3	5.23	8.63	3.12	2.02	1.14	0.88	3.87	1.70	1.40	0.398	0.92	2.04
			5		4.993	3.92	0.202	20.0	41.6	6.31	10.9	3.76	2.00	1.12	0.87	4.74	2.07	1.71	0.396	0.95	2.08
			6		5.908	4.64	0.201	23.4	50.0	7.29	13.1	4.34	1.96	1.11	0.86	5.59	2.43	1.99	0.393	0.99	2.12
			7		6.802	5.34	0.201	26.5	58.1	8.24	15.5	4.97	1.98	1.10	0.86	6.40	2.78	2.29	0.389	1.03	2.15
7/4.5	70	45	4	7.5	4.553	3.57	0.226	23.2	45.9	7.55	12.3	4.40	2.26	1.29	0.98	4.86	2.17	1.77	0.410	1.02	2.24
			5		5.609	4.40	0.225	28.0	57.1	9.13	15.4	5.40	2.23	1.28	0.98	5.92	2.65	2.19	0.407	1.06	2.28
			6		6.644	5.22	0.225	32.5	68.4	10.6	18.6	6.35	2.21	1.26	0.98	6.95	3.12	2.59	0.404	1.09	2.32
			7		7.658	6.01	0.225	37.2	80.0	12.0	21.8	7.16	2.20	1.25	0.97	8.03	3.57	2.94	0.402	1.13	2.36
7.5/5	75	50	5	8	6.126	4.81	0.245	34.9	70.0	12.6	21.0	7.41	2.39	1.44	1.10	6.83	3.3	2.74	0.435	1.17	2.40
			6		7.260	5.70	0.245	41.1	84.3	14.7	25.4	8.54	2.38	1.42	1.08	8.12	3.88	3.19	0.435	1.21	2.44
			8		9.467	7.43	0.244	52.4	113	18.5	34.2	10.9	2.35	1.40	1.07	10.5	4.99	4.10	0.429	1.29	2.52
			10		11.59	9.10	0.244	62.7	141	22.0	43.4	13.1	2.33	1.38	1.06	12.8	6.04	4.99	0.423	1.36	2.50

续表

型号	截面尺寸（mm）				截面面积（cm^2）	理论质量（kg/m）	外表面积（m^2/m）	惯性矩（cm^4）					惯性半径（cm）			截面模数（cm^3）			tanα	重心距离（cm）	
	B	b	d	r				I_x	I_{x1}	I_y	I_{y1}	I_u	i_x	i_y	i_u	W_x	W_y	W_z		X_0	Y_0
8/5	80	50	5	8	6.376	5.00	0.255	42.0	85.2	12.8	21.1	7.66	2.56	1.42	1.10	7.78	3.32	2.74	0.388	1.14	2.60
			6		7.560	5.93	0.255	49.5	103	15.0	25.4	8.85	2.56	1.41	1.08	9.25	3.91	3.20	0.387	1.18	2.65
			7		8.724	6.85	0.255	56.2	119	17.0	29.8	10.2	2.54	1.39	1.08	10.6	4.48	3.70	0.384	1.21	2.69
			8		9.867	7.75	0.254	62.8	136	18.9	34.3	11.4	2.52	1.38	1.07	11.9	5.03	4.16	0.381	1.25	2.73
9/5.6	90	56	5	9	7.212	5.66	0.287	60.5	121	18.3	29.5	11.0	2.90	1.59	1.23	9.92	4.21	3.49	0.385	1.25	2.91
			6		8.557	6.72	0.286	71.0	146	21.4	35.6	12.9	2.88	1.58	1.23	11.7	4.96	4.13	0.384	1.29	2.95
			7		9.881	7.76	0.286	81.0	170	24.4	41.7	14.7	2.86	1.57	1.22	13.5	5.70	4.72	0.382	1.33	3.00
			8		11.18	8.78	0.286	91.0	194	27.2	47.9	16.3	2.85	1.56	1.21	15.3	6.41	5.29	0.380	1.36	3.04
10/6.3	100	63	6	10	9.618	7.55	0.320	99.1	200	30.9	50.5	18.4	3.21	1.79	1.38	14.6	6.35	5.25	0.394	1.43	3.24
			7		11.111	8.72	0.320	113	233	35.3	59.1	21.0	3.20	1.78	1.38	16.9	7.29	6.02	0.394	1.47	3.28
			8		12.58	9.88	0.319	127	266	39.4	67.9	23.5	3.18	1.77	1.37	19.1	8.21	6.78	0.391	1.50	3.32
			10		15.47	12.1	0.319	154	333	47.1	85.7	28.3	3.15	1.74	1.35	23.3	9.98	8.24	0.387	1.58	3.40
10/8	100	80	6	10	10.64	8.35	0.354	107	200	61.2	103	31.7	3.17	2.40	1.72	15.2	10.2	8.37	0.627	1.97	2.95
			7		12.30	9.66	0.354	123	233	70.1	120	36.2	3.16	2.39	1.72	17.5	11.7	9.60	0.626	2.01	3.00
			8		13.94	10.9	0.353	138	267	78.6	137	40.6	3.14	2.37	1.71	9.8	13.2	10.8	0.625	2.05	3.04
			10		17.17	13.5	0.353	167	834	94.7	172	49.1	3.12	2.35	1.69	24.2	16.1	13.1	0.622	2.13	3.12
11/7	110	70	6	10	10.64	8.35	0.354	133	266	42.9	69.1	25.4	3.54	2.01	1.54	17.9	7.90	6.53	0.403	1.57	3.53
			7		12.30	9.66	0.354	153	310	49.0	80.8	29.0	3.53	2.00	1.53	20.6	9.09	7.50	0.402	1.61	3.57
			8		13.94	10.9	0.353	172	354	54.9	92.7	32.5	3.51	1.98	1.53	23.3	10.3	8.45	0.401	1.65	3.62
			10		17.17	13.5	0.353	208	443	65.9	117	39.2	3.48	1.96	1.51	28.5	12.5	10.3	0.397	1.72	3.70
12.5/8	125	80	7	11	14.10	11.1	0.403	228	455	74.4	120	43.8	4.02	2.30	1.76	26.9	12.0	9.92	0.408	1.80	4.01
			8		15.99	12.6	0.403	257	520	83.5	138	49.2	4.01	2.28	1.75	30.4	13.6	11.2	0.407	1.84	4.06
			10		19.71	15.5	0.402	312	650	101	173	59.5	3.98	2.26	1.74	37.3	16.6	13.6	0.404	1.92	4.14
			12		23.35	18.3	0.402	364	780	117	210	69.4	3.95	2.24	1.72	44.0	19.4	16.0	0.400	2.00	4.22

续表

型号	截面尺寸（mm）				截面面积（cm^2）	理论质量（kg/m）	外表面积（m^2/m）	惯性矩（cm^4）					惯性半径（cm）			截面模数（cm^3）			$\tan\alpha$	重心距离（cm）	
	B	b	d	r				I_x	I_{x1}	I_y	I_{y1}	I_u	i_x	i_y	i_u	W_x	W_y	W_z		X_0	Y_0
14/9	140	90	8	12	18.04	14.2	0.453	366	731	121	196	70.8	4.50	2.59	1.98	38.5	17.3	14.3	0.411	2.04	4.50
			10		22.26	17.5	0.452	446	913	140	246	85.8	4.47	2.56	1.96	47.3	21.2	17.5	0.409	2.12	4.58
			12		26.40	20.7	0.451	522	1100	170	297	100	4.44	2.54	1.95	55.9	25.0	20.5	0.406	2.19	4.66
			14		30.46	23.9	0.451	594	1280	192	349	114	4.42	2.51	1.94	64.2	28.5	23.5	0.403	2.27	4.74
15/19	150	90	8		18.84	14.8	0.473	442	898	123	196	74.1	4.84	2.55	1.98	43.9	17.5	14.5	0.364	1.97	4.92
			10		23.26	18.3	0.472	539	1120	149	246	89.9	4.81	2.53	1.97	54.0	21.4	17.7	0.362	2.05	5.01
			12		27.60	21.7	0.471	632	1350	173	297	105	4.79	2.50	1.95	63.8	25.1	20.8	0.359	2.12	5.09
			14		31.86	25.0	0.471	721	1570	196	350	120	4.76	2.48	1.94	73.3	28.8	23.8	0.356	2.20	5.17
			15		33.95	26.7	0.471	764	1680	207	376	127	4.74	2.47	1.93	78.0	30.5	25.3	0.354	2.24	5.21
			16		36.03	28.3	0.470	806	1800	217	403	134	4.73	2.45	1.93	82.6	32.3	26.8	0.352	2.27	5.25
16/10	160	100	10	13	25.32	19.9	0.512	669	1360	205	337	122	5.14	2.85	2.19	62.1	26.6	21.9	0.390	2.28	5.24
			12		30.05	23.6	0.511	785	1640	239	406	142	5.11	2.82	2.17	73.5	31.3	25.8	0.388	2.36	5.32
			14		34.71	27.2	0.510	896	1910	271	476	162	5.08	2.80	2.16	84.6	35.8	29.6	0.385	2.43	5.40
			16		39.28	30.8	0.510	1000	2180	302	548	183	5.05	2.77	2.16	95.3	40.2	33.4	0.382	2.51	5.48
18/11	180	110	10	14	28.37	22.3	0.571	956	1940	278	447	167	5.80	3.13	2.42	79.0	32.5	26.9	0.376	2.44	5.89
			12		33.71	26.5	0.571	1120	2330	325	539	195	5.78	3.10	2.40	93.5	38.3	31.7	0.374	2.52	6.98
			14		38.97	30.6	0.570	1290	2720	370	632	222	5.75	3.08	2.39	108	44.0	36.3	0.372	2.59	6.06
			15		44.14	34.6	0.569	1440	3110	412	426	249	5.72	3.06	2.38	122	49.4	40.9	0.369	2.67	6.14
20/12.5	200	125	12		37.91	29.8	0.641	1570	3190	483	788	266	6.44	3.57	2.74	117	50.0	41.2	0.392	2.83	6.54
			14		43.87	34.4	0.640	1800	3730	551	922	327	6.41	3.54	2.73	135	57.4	47.3	0.390	2.91	6.62
			16		49.74	39.0	0.639	2020	4260	615	1060	356	6.38	3.52	2.71	152	64.9	53.3	0.388	2.99	6.70
			18		55.53	43.6	0.639	2240	4790	677	1200	405	6.35	3.49	2.70	169	71.7	59.2	0.385	3.06	6.78

注　截面图中的 $r_1=1/3d$ 及表中 r 的数据用于孔型设计，不做交货条件。

表 F-8　　角钢尺寸、外形允许偏差　　mm

项目		允许偏差		图示
		等边角钢	不等边角钢	
边宽度（B，b）	边宽度[a]≤56	±0.8	±0.8	
	>56～90	±1.2	±1.5	
	>90～140	±1.8	±2.0	
	>140～200	±2.5	±2.5	
	>200	±3.5	±3.5	
边厚度（d）	边宽度[a]≤56	±0.4		
	>56～90	±0.6		
	>90～140	±0.7		
	>140～200	±1.0		
	>200	±1.4		
顶端直角		α≤50′		
弯曲度		每米弯曲度≤3mm 总弯曲度≤总长度的 0.3%		适用于上下、左右大弯曲

[a] 不等边角钢按长边宽度 B。

F.2　槽钢

F.2.1　热轧槽钢尺寸、外形、质量及允许偏差

GB/T 706—2016 适用于腿部内侧有斜度的热轧槽钢，根据需要摘录如下。

F.2.1.1　尺寸

（1）截面尺寸及运行偏差。

1）槽钢的截面图示及标准符号如图 F-3 所示。

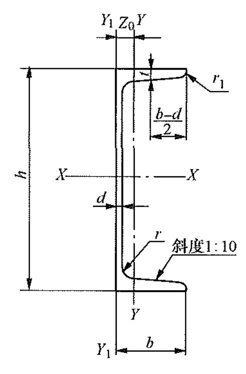


图 F-3　槽钢截面图

h—高度；b—腿宽度；d—腰厚度；t—平均腿厚度；
r—内圆弧半径；r_1—腿端圆弧半径；Z_0—YY 轴与 Y_1Y_1 轴间距

2）槽钢的尺寸、截面面积、理论质量及截面特性参数应符合表 F-9 的规定。

3）经供需双方协议，可供应表 F-9 中所规定的槽钢。

4）截面尺寸允许偏差。槽钢的高度 h、腿宽度 b，腰厚度 δ 尺寸允许偏差应符合表 F-10 的规定。

（2）长度及允许偏差。

1）角钢的通常长度为 4000～19000mm，其他型钢的通常长度为 5000～19000mm，根据需方要求也可供应其他长度产品。

2）定尺、倍尺长度。槽钢按定尺或倍尺长度交货时，应在合同中注明。

F.2.1.2　质量及允许误差

（1）槽钢按理论质量或实际质量交货。

（2）槽钢计算理论质量时，钢的密度为 7.85g/cm³。

（3）槽钢截面面积的计算公式为

$$hd + 2t\times(b-d) + 0.349\times(r^2 - r_1^2) \qquad \text{(F-1)}$$

（4）根据双方协议，槽钢每米质量允许偏差不得超过 $^{+3}_{-5}$% 。

表 F-9 槽钢截面尺寸、截面面积、理论质量及截面特性

型号	截面尺寸（mm）						截面面积（cm^2）	理论质量（kg/m）	外表面积（m^2/m）	惯性矩（cm^4）			惯性半径（cm）		截面模数（cm^3）		重心距离（cm）
	h	b	d	t	r	r_1				I_x	I_y	I_{y1}	i_x	i_y	W_x	W_y	Z_0
5	50	37	4.5	7.0	7.0	3.5	6.925	5.44	0.226	26.0	8.30	20.9	1.94	1.10	10.4	3.55	1.35
6.3	63	40	4.8	7.5	7.5	3.8	8.446	6.63	0.262	50.8	11.9	28.4	2.45	1.19	16.1	4.50	1.36
6.5	65	40	4.3	7.5	7.5	3.8	8.292	6.51	0.267	55.2	12.0	28.3	2.54	1.19	17.0	4.59	1.38
8	80	43	5.0	8.0	8.0	4.0	10.24	8.04	0.307	101	16.6	37.4	3.15	1.27	25.3	5.79	1.43
10	100	48	5.3	8.5	8.5	4.2	12.74	10.0	0.365	198	25.6	54.9	3.95	1.41	39.7	7.80	1.52
12	120	53	5.5	9.0	9.0	4.5	15.36	12.1	0.423	346	37.4	77.7	4.75	1.56	57.7	10.2	1.62
12.6	126	53	5.5	9.0	9.0	4.5	15.69	12.3	0.435	391	38.0	77.1	4.95	1.57	62.1	10.2	1.69
14a	140	58	6.0	9.5	9.5	4.8	18.51	14.5	0.480	564	53.2	107	5.52	1.70	80.5	13.0	1.71
14b	140	60	8.0	9.5	9.5	4.8	21.31	16.7	0.484	609	61.1	121	5.35	1.69	87.1	14.1	1.67
16a	160	63	6.5	10.0	10.0	5.0	21.95	17.2	0.538	866	73.3	144	6.28	1.83	108	16.3	1.80
16b	160	65	8.5	10.0	10.0	5.0	25.15	19.8	0.542	935	83.4	161	6.10	1.82	117	17.6	1.75
18a	180	68	7.0	10.5	10.5	5.2	25.69	20.2	0.596	1270	98.6	190	7.04	1.96	141	20.0	1.88
18b	180	70	9.0	10.5	10.5	5.2	29.29	23.0	0.600	1370	111	210	6.84	1.95	152	21.5	1.84
20a	200	73	7.0	11.0	11.0	5.5	28.83	22.6	0.654	1780	128	244	7.86	2.11	178	24.2	2.01
20b	200	75	9.0	11.0	11.0	5.5	32.83	25.8	0.658	1910	144	268	7.64	2.09	191	25.9	1.95
22a	220	77	7.0	11.5	11.5	5.8	31.83	25.0	0.709	2390	158	298	8.67	2.23	218	28.2	2.10
22b	220	79	9.0	11.5	11.5	5.8	36.23	28.5	0.713	2570	176	326	8.42	2.21	234	30.1	2.03
24a	240	78	7.0	12.0	12.0	6.0	34.21	26.9	0.752	3050	174	325	9.45	2.25	254	30.5	2.10
24b	240	80	9.0	12.0	12.0	6.0	39.01	30.6	0.756	3280	194	355	9.17	2.23	274	32.5	2.03
24c	240	82	11.0	12.0	12.0	6.0	43.81	34.4	0.760	3510	213	388	8.96	2.21	293	34.4	2.00

续表

型号	截面尺寸（mm）						截面面积（cm³）	理论质量（kg/m）	外表面积（m²/m）	惯性矩（cm⁴）			惯性半径（cm）		截面模数（cm³）		重心距离（cm）
	h	b	d	t	r	r_1				I_x	I_y	I_{y1}	i_x	i_y	W_x	W_y	Z_0
25a		78	7.0				34.91	27.4	0.722	3370	176	322	9.82	2.24	270	30.6	2.07
25b	250	80	9.0	12.0	12.0	6.0	39.91	31.3	0.776	3530	196	353	9.41	2.22	282	32.7	1.98
25c		82	11.0				44.91	35.3	0.780	3690	218	384	9.07	2.21	295	35.9	1.92
27a		82	7.5				39.27	30.8	0.826	4360	216	393	10.5	2.34	323	35.5	2.13
27b	270	84	9.5				44.67	35.1	0.830	4690	239	428	10.3	2.31	347	37.7	2.06
27c		86	11.5	12.5	12.5	6.2	50.07	39.3	0.834	5020	261	467	10.1	2.28	372	39.8	2.03
28a		82	7.5				40.02	31.4	0.846	4760	218	388	10.9	2.33	340	35.7	2.10
28b	280	84	9.5				45.62	35.8	0.850	5130	242	428	10.6	2.30	366	37.9	2.02
28c		86	11.5				51.22	40.2	0.854	5500	268	463	10.4	2.29	393	40.3	1.95
30a		85	7.5				43.89	34.5	0.897	6050	260	467	11.7	2.43	403	41.1	2.17
30b	300	87	9.5	13.5	13.5	6.8	49.89	39.2	0.901	6500	289	515	11.4	2.41	433	44.0	2.13
30c		89	11.5				55.89	43.9	0.905	6950	316	560	11.2	2.38	463	46.4	2.09
32a		88	8.0				48.50	38.1	0.947	7600	305	552	12.5	2.50	475	46.5	2.24
32b	320	90	10.0	14.0	14.0	7.0	54.90	43.1	0.951	8140	336	593	12.2	2.47	509	49.2	2.16
32c		92	12.0				61.30	48.1	0.955	8690	374	643	11.9	2.47	543	52.6	2.09
36a		96	9.0				60.89	47.8	1.053	11900	455	818	14.0	2.73	660	63.5	2.44
36b	360	98	11.0	16.0	16.0	8.0	68.09	53.5	1.057	12700	497	880	13.6	2.70	703	66.9	2.37
36c		100	13.0				75.29	59.1	1.061	13400	536	948	13.4	2.67	746	70.0	2.34
40a		100	10.5				75.04	58.9	1.144	17600	592	1070	15.3	2.81	879	78.8	2.49
40b	400	102	12.5	18.0	18.0	9.0	83.04	65.2	1.148	18600	640	1140	15.0	2.78	932	82.5	2.44
40c		104	14.5				91.04	71.5	1.152	19700	688	1220	14.7	2.75	986	86.2	2.42

注　表中 r、r_1 的数据用于孔型设计，不做交货条件。

表 F-10　　工字钢、槽钢尺寸、外形允许偏差　　mm

项　目		允许偏差	图示
高度（h）	$h<100$	±1.5	
	$100\leqslant h<200$	±2.0	
	$200\leqslant h<400$	±3.0	
	$h\geqslant 400$	±4.0	
腿宽度（b）	$h<100$	±1.5	
	$100\leqslant h<150$	±2.0	
	$150\leqslant h<200$	±2.5	
	$200\leqslant h<300$	±3.0	
	$300\leqslant h<400$	±3.5	
	$h\geqslant 400$	±4.0	
腰厚度（d）	$h<100$	±0.4	
	$100\leqslant h<200$	±0.5	
	$200\leqslant h<300$	±0.7	
	$300\leqslant h<400$	±0.8	
	$h\geqslant 400$	±0.9	
外缘斜度（T_1、T_2）		T_1、$T_2\leqslant 1.5\%b$ $T_1+T_2\leqslant 2.5\%b$	
弯腰挠度（W）		$W\leqslant 0.15d$	

F.3　钢管

F.3.1 直缝电焊钢管

根据GB/T 13793—2016的规定，摘录有关内容如下。

F.3.1.1 尺寸、质量

（1）钢管的外径、壁厚应符合表F-11（GB/T 21835—2008）的规定。根据需方要求，经供需双方协议，可以供应其他尺寸的钢管。

表 F-11 普通焊接钢管尺寸及单位长度理论质量

系列			壁厚（mm）																		
系列 1			0.5	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4		1.6		1.8		2.0		2.3		2.6		2.9	
系列 2									1.5		1.7		1.9		2.2		2.4		2.8		3.1
外径（mm）			单位长度理论质量（kg/m）																		
系列 1	系列 2	系列 3																			
10.2			0.120	0.142	0.185	0.227	0.266	0.304	0.322	0.339	0.356	0.373	0.389	0.404	0.434	0.448	0.462	0.487	0.511	0.522	
	12		0.142	0.169	0.221	0.271	0.320	0.366	0.388	0.410	0.432	0.453	0.473	0.439	0.532	0.550	0.568	0.603	0.635	0.651	0.680
	12.7		0.150	0.179	0.235	0.289	0.340	0.39	0.414	0.438	0.461	0.484	0.506	0.528	0.57	0.59	0.61	0.648	0.684	0.701	0.734
13.5			0.16	0.191	0.251	0.308	0.364	0.418	0.444	0.47	0.495	0.519	0.544	0.567	0.613	0.635	0.657	0.699	0.739	0.758	0.795
		14	0.166	0.198	0.26	0.321	0.379	0.435	0.462	0.489	0.516	0.542	0.567	0.592	0.64	0.664	0.687	0.731	0.773	0.794	0.833
	16		0.191	0.288	0.3	0.37	0.438	0.504	0.536	0.568	0.6	0.63	0.661	0.691	0.749	0.777	0.805	0.859	0.911	0.937	0.986
17.2			0.205	0.246	0.324	0.4	0.474	0.546	0.581	0.616	0.65	0.684	0.717	0.75	0.814	0.845	0.876	0.936	0.994	1.02	1.08
		18	0.216	0.257	0.339	0.419	0.497	0.573	0.61	0.647	0.683	0.719	0.754	0.789	0.857	0.891	0.923	0.987	1.05	1.08	1.14
	19		0.228	0.272	0.359	0.444	0.527	0.608	0.647	0.687	0.725	0.764	0.801	0.838	0.911	0.947	0.983	1.05	1.12	1.15	1.22
	20		0.24	0.287	0.379	0.469	0.556	0.642	0.684	0.726	0.767	0.808	0.848	0.888	0.966	1	1.04	1.12	1.19	1.22	1.29
21.3			0.256	0.306	0.404	0.501	0.595	0.687	0.732	0.777	0.822	0.866	0.909	0.952	1.04	1.08	1.12	1.2	1.28	1.32	1.39
		22	0.265	0.317	0.418	0.518	0.616	0.711	0.758	0.805	0.851	0.897	0.942	0.986	1.07	1.12	1.16	1.24	1.33	1.37	1.44
	25		0.302	0.361	0.477	0.592	0.704	0.815	0.869	0.923	0.977	1.03	1.082	1.13	1.24	1.29	1.34	1.44	1.53	1.58	1.67
		25.4	0.307	0.367	0.485	0.602	0.716	0.829	0.884	0.939	0.994	1.05	1.1	1.15	1.26	1.31	1.36	1.46	1.56	1.61	1.7
26.9			0.326	0.389	0.515	0.639	0.761	0.88	0.94	0.998	1.06	1.11	1.17	1.23	1.34	1.4	1.45	1.56	1.66	1.72	1.82
		30	0.364	0.435	0.576	0.715	0.852	0.987	1.05	1.12	1.19	1.25	1.32	1.38	1.51	1.57	1.63	1.76	1.88	1.94	2.06
	31.8		0.386	0.462	0.612	0.76	0.906	1.05	1.12	1.19	1.26	1.33	1.4	1.47	1.61	1.67	1.74	1.87	2	2.07	2.19
	32		0.388	0.465	0.616	0.765	0.911	1.06	1.13	1.2	1.27	1.34	1.41	1.48	1.62	1.68	1.75	1.89	2.02	2.08	2.21
33.7			0.409	0.49	0.649	0.806	0.952	1.12	1.19	1.27	1.34	1.42	1.49	1.56	1.71	1.78	1.85	1.99	2.13	2.2	2.34
		35	0.425	0.509	0.675	0.838	1.000	1.16	1.24	1.32	1.4	1.47	1.55	1.63	1.78	1.85	1.93	2.08	2.22	2.3	2.44
	38		0.462	0.553	0.734	0.912	1.090	1.26	1.35	1.44	1.52	1.61	1.69	1.78	1.94	2.02	2.11	2.27	2.43	2.51	2.67
	40		0.487	0.583	0.773	0.962	1.150	1.33	1.42	1.52	1.61	1.7	1.79	1.87	2.05	2.14	2.23	2.4	2.57	2.65	2.82

续表

系列			壁厚（mm）																		
系列 1			3.2		3.6		4.0		4.5		5.0		5.4		5.6		6.3		7.1		
系列 2				3.4		3.8		4.37		4.78		5.16		5.56		6.02		6.35		7.92	
外径（mm）			单位长度理论质量（kg/m）																		
系列 1	系列 2	系列 3																			
10.2																					
	12																				
	12.7																				
13.5																					
		14																			
	16		1.01	1.06	1.1	1.14															
17.2			1.1	1.15	1.21	1.26															
		18	1.17	1.22	1.28	1.33															
	19		1.25	1.31	1.37	1.42															
	20		1.33	1.39	1.46	1.52	1.580	1.68													
21.3			1.43	1.5	1.57	1.64	1.71	1.83	1.86	1.95											
		22	1.48	1.56	1.63	1.71	1.780	1.9	1.94	2.03											
	25		1.72	1.81	1.9	1.99	2.070	2.22	2.28	2.38	2.47										
		25.4	1.75	1.84	1.94	2.02	2.110	2.27	2.32	2.43	2.52										
26.9			1.87	1.97	2.07	2.16	2.260	2.43	2.49	2.61	2.7	2.77									
		30	2.11	2.23	2.34	2.46	2.560	2.76	2.83	2.97	3.08	3.16									
	31.8		2.26	2.38	2.5	2.62	2.740	2.96	3.03	3.19	3.3	3.39									
	32		2.27	2.4	2.52	2.64	2.760	2.98	3.05	3.21	3.33	3.42									
33.7			2.41	2.54	2.67	2.8	2.930	3.16	3.24	3.41	3.54	3.63									
		35	2.51	2.65	2.79	2.92	3.060	3.3	3.38	3.56	3.7	3.8									
	38		2.75	2.9	3.05	3.21	3.350	3.62	3.72	3.92	4.07	4.18									
	40		2.9	3.07	3.23	3.39	3.550	3.84	3.94	4.15	4.32	4.43									

续表

系列			壁厚（mm）																		
系列 1			0.5	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4		1.6		1.8		2.0		2.3		2.6		2.9	
系列 2									1.5		1.7		1.9		2.2		2.4		2.8		3.1
外径（mm）			单位长度理论质量（kg/m）																		
系列 1	系列 2	系列 3																			
42.4			0.517	0.619	0.821	1.02	1.220	1.42	1.51	1.61	1.71	1.8	1.9	1.99	2.18	2.27	2.37	2.55	2.73	2.82	3
		44.5	0.543	0.65	0.862	1.07	1.280	1.49	1.59	1.69	1.79	1.9	2	2.1	2.29	2.39	2.49	2.69	2.88	2.98	3.17
48.3				0.706	0.937	1.17	1.390	1.62	1.73	1.84	1.95	2.06	2.17	2.28	2.5	2.61	2.72	2.93	3.14	3.25	3.46
	51			0.746	0.99	1.23	1.47	1.71	1.83	1.95	2.07	2.18	2.3	2.42	2.65	2.76	2.88	3.1	3.33	3.44	3.66
		54		0.79	1.05	1.31	1.560	1.82	1.94	2.07	2.1	2.32	2.44	2.56	2.81	2.93	3.05	3.3	3.54	3.65	3.89
	57			0.835	1.11	1.38	1.650	1.92	2.05	2.19	2.32	2.45	2.58	2.71	2.97	3.1	3.23	3.49	3.74	3.87	4.12
60.3				0.883	1.17	1.46	1.750	2.03	2.18	2.32	2.46	2.6	2.74	2.88	3.15	3.29	3.43	3.7	3.97	4.11	4.37
	63.5			0.931	1.24	1.54	1.840	2.14	2.29	2.44	2.59	2.74	2.89	3.03	3.33	3.47	3.62	3.9	4.19	4.32	4.62
	70				1.37	1.7	2.040	2.37	2.53	2.7	2.86	3.03	3.19	3.35	3.68	3.84	4	4.32	4.64	4.8	5.11
		73			1.42	1.78	2.120	2.47	2.64	2.82	2.99	3.16	3.33	3.5	3.84	4.01	4.18	4.51	4.85	5.01	5.34
76.1					1.49	1.85	2.220	2.58	2.76	2.94	3.12	3.3	3.48	3.65	4.01	4.19	4.36	4.71	5.06	5.24	5.58
		82.5			1.61	2.01	2.410	2.8	3	3.19	3.39	3.58	3.78	3.97	4.36	4.55	4.74	5.12	5.5	5.65	6.07
88.9					1.74	2.17	2.600	3.02	3.23	3.44	3.66	3.87	4.08	4.2	4.7	4.91	5.12	5.53	5.95	6.15	6.56
	101.6						2.97	3.45	3.70	3.95	4.19	4.43	4.67	4.91	5.39	5.63	5.87	6.35	6.82	7.06	7.53
		108					3.160	3.68	3.94	4.2	4.46	4.71	4.97	5.23	5.74	6	6.25	6.76	7.26	7.52	8.02
114.3							3.350	3.9	4.17	4.45	4.72	4.99	5.27	5.54	6.08	6.35	6.62	7.16	7.7	7.97	8.5
	127									4.95	5.25	5.56	5.86	6.17	6.77	7.07	7.37	7.98	8.58	8.88	9.47
	133									5.18	5.5	5.82	6.14	6.46	7.1	7.41	7.73	8.36	8.99	9.3	9.93
139.7										5.45	5.79	6.12	6.46	6.79	7.46	7.79	8.13	8.79	9.45	9.78	10.44
		141.3								5.51	5.85	6.19	6.53	6.87	7.55	7.88	8.22	8.89	9.56	9.9	10.57
		152.4								5.95	6.32	6.69	7.05	7.42	8.15	8.51	8.88	9.61	10.33	10.69	11.41
		159								6.21	6.59	6.98	7.36	7.74	8.51	8.89	9.27	10.03	10.79	11.15	11.92

续表

系列			壁厚（mm）																		
系列1			3.2		3.6		4.0		4.5		5.0		5.4		5.6		6.3		7.1		
系列2				3.4		3.8		4.37		4.78		5.16		5.56		6.02		6.35		7.92	
外径（mm）			单位长度理论质量（kg/m）																		
系列1	系列2	系列3																			
42.4			3.090	3.27	3.44	3.62	3.790	4.1	4.21	4.43	4.61	4.74	4.93	5.05	5.08	5.4					
		44.5	3.26	3.45	3.63	3.81	4.000	4.32	4.44	4.68	4.87	5.01	5.21	5.34	5.37	5.71					
48.3			3.56	3.76	3.97	4.17	4.370	4.73	4.86	5.13	5.34	5.49	5.71	5.86	5.9	6.28					
	51		3.77	3.99	4.21	4.42	4.640	5.03	5.16	5.45	5.67	5.83	6.07	6.23	6.27	6.68					
		54	4.01	4.24	4.47	4.7	4.930	5.35	5.49	5.8	6.04	6.22	6.47	6.64	6.68	7.12					
	57		4.25	4.49	4.74	4.99	5.230	5.67	5.83	6.16	6.41	6.6	6.87	7.05	7.1	7.57					
60.3			4.51	4.77	5.03	5.29	5.550	6.03	6.19	6.54	6.82	7.02	7.31	7.51	7.55	8.06					
	63.5		4.76	5.04	5.32	5.59	5.870	6.37	6.55	6.92	7.21	7.42	7.74	7.94	8	8.53					
	70		5.27	5.58	5.9	6.2	6.510	7.07	7.27	7.69	8.01	8.25	8.6	8.84	8.89	9.5	9.9	9.97			
		73	5.51	5.84	6.16	6.48	6.810	7.4	7.6	8.04	8.38	8.63	9	9.25	9.31	9.94	10.36	10.44			
76.1			5.75	6.1	6.44	6.78	7.110	7.73	7.95	8.41	8.77	9.03	9.42	9.67	9.74	10.4	10.84	10.92			
		82.5	6.26	6.63	7	7.38	7.740	8.42	8.66	9.16	9.56	9.84	10.27	10.55	10.62	11.35	11.84	11.93			
88.9			6.76	7.17	7.57	7.98	8.380	9.11	9.37	9.92	10.35	10.66	11.12	11.43	11.5	12.3	12.83	12.93			
	101.6		7.77	8.23	8.7	9.17	9.630	10.48	10.78	11.41	11.91	12.27	12.81	13.17	13.26	14.19	14.81	14.92			
		108	8.27	8.77	9.27	9.76	10.26	11.17	11.49	12.17	12.7	13.09	13.66	14.05	14.14	15.14	15.8	15.92			
114.3			8.77	9.3	9.83	10.36	10.88	11.85	12.19	12.91	13.48	13.89	14.5	14.91	15.01	16.08	16.78	16.91	18.77	20.78	
	127		9.77	10.36	10.96	11.55	12.13	13.22	13.59	14.41	15.04	15.5	16.19	16.65	16.77	17.96	18.75	18.89	20.99	23.26	
	133		10.24	10.87	11.49	12.11	12.73	13.86	14.26	15.11	15.78	16.27	16.99	17.47	17.59	18.85	19.69	19.83	22.04	24.43	
139.7				10.77	11.43	12.08	12.74	13.39	14.58	15.9	16.61	17.12	17.89	18.39	18.52	19.85	20.73	20.88	23.22	25.74	
		141.3	10.5	11.56	12.23	12.89	13.54	14.76	15.18	16.09	16.81	17.32	18.1	18.61	18.74	20.08	20.97	21.13	23.5	26.05	
		152.4	11.77	12.49	13.21	13.93	14.64	15.95	16.41	17.4	18.18	18.74	19.58	20.13	20.27	21.73	22.7	22.87	25.44	28.22	
		159	12.3	13.05	13.8	14.54	15.29	16.66	17.15	18.18	18.99	19.58	20.46	21.04	21.19	22.71	23.72	23.91	26.6	29.51	

续表

系列			壁厚（mm）																		
系列 1			8		8.8		10		11		12.5		14.2		16		17.5		20		
系列 2				8.74		9.53		10.31		11.91		12.7		15.09		16.66		19.05		20.62	
外径（mm）			单位长度理论质量（kg/m）																		
系列 1	系列 2	系列 3																			
42.4																					
		44.5																			
48.3																					
	51																				
		54																			
	57																				
60.3																					
	63.5																				
	70																				
		73																			
76.1																					
		82.5																			
88.9																					
	101.6																				
		108																			
114.3			20.97																		
	127		23.48																		
	133		24.56																		
139.7			25.98																		
		141.3	26.3																		
		152.4	28.49																		
		159	29.79	32.39																	

续表

系列			壁厚（mm）																		
系列 1			0.5	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4		1.6		1.8		2.0		2.3		2.6		2.9	
系列 2									1.5		1.7		1.9		2.2		2.4		2.8		3.1
外径（mm）			单位长度理论质量（kg/m）																		
系列 1	系列 2	系列 3																			
		165								6.45	6.85	7.24	7.64	8.04	8.83	9.23	9.62	10.41	11.2	11.59	12.38
168.3										6.58	6.98	7.39	7.8	8.2	9.01	9.42	9.82	10.62	11.43	11.83	12.63
		177.8										7.81	8.24	8.67	9.53	9.95	10.38	11.23	12.08	12.51	13.36
		190.7										8.39	8.85	9.31	10.23	10.69	11.15	12.06	12.97	13.43	14.34
		193.7										8.52	8.99	9.46	10.39	10.86	11.32	12.25	13.18	13.65	14.57
219.1												9.65	10.18	10.71	11.77	12.3	12.83	13.88	14.94	15.46	16.51
		244.5												11.96	13.15	13.73	14.33	15.51	16.69	17.28	18.46
273.1														13.37	14.7	15.36	16.02	17.34	18.66	19.32	20.64
323.9																		20.6	22.17	22.96	24.53
355.6																		22.63	24.36	25.22	26.95
406.4																		25.89	27.87	28.86	30.83
457																					
508																					
		559																			
610																					
		660																			
711																					
	762																				
813																					
		864																			
914																					
		965																			

续表

系列			壁厚（mm）																	
系列 1			3.2		3.6		4.0		4.5		5.0		5.4		5.6		6.3		7.1	
系列 2				3.4		3.8		4.37		4.78		5.16		5.56		6.02		6.35		7.92
外径（mm）			单位长度理论质量（kg/m）																	
系列 1	系列 2	系列 3																		
		165	12.77	13.55	14.33	15.11	15.88	17.31	17.81	18.89	19.73	20.34	21.25	21.86	22.01	23.6	24.66	24.84	27.55	30.68
168.3			13.03	13.83	14.62	15.41	16.21	17.67	18.18	19.28	20.14	20.76	21.09	22.31	22.47	24.09	25.17	25.36	28.23	31.33
		177.8	13.78	14.62	15.47	16.31	17.14	18.69	19.23	20.4	21.31	21.97	22.96	23.62	23.78	25.5	26.65	26.85	29.88	33.18
		190.7	14.8	15.7	16.51	17.52	18.42	20.08	20.66	21.92	22.9	23.61	24.68	25.39	25.56	27.42	28.65	28.87	32.15	35.7
		193.7	15.03	15.96	16.88	17.8	18.71	20.4	21	22.27	23.27	24	25.07	25.8	25.98	27.86	29.12	29.34	32.67	36.29
219.1			17.04	18.09	19.13	20.18	21.22	23.14	23.81	25.26	26.4	27.22	28.46	29.28	29.49	31.63	33.06	33.32	37.12	41.25
		244.5	19.04	22.02	21.39	22.56	23.72	25.88	26.63	28.26	29.53	30.45	31.83	32.76	32.99	35.41	37.01	37.2	41.57	46.21
273.1			21.3	22.61	23.93	25.24	26.54	28.96	29.81	31.63	33.06	34.09	35.65	36.68	36.94	39.65	40.45	41.77	46.58	51.79
323.9			25.31	26.87	28.44	30	31.55	34.43	35.44	37.62	39.32	40.56	42.41	43.65	43.96	47.19	47.34	49.73	55.47	61.72
355.6			27.81	29.53	31.25	32.97	34.68	37.85	38.96	41.35	43.22	44.59	46.63	48	48.34	51.9	54.27	54.69	61.02	67.91
406.4			31.82	33.79	35.76	37.73	39.69	43.32	44.6	47.34	49.5	51.06	53.4	54.96	55.35	59.44	62.16	62.65	69.92	77.83
457			35.81	38.03	40.25	42.27	44.68	48.78	50.23	53.31	55.79	57.5	60.14	61.9	62.34	66.95	70.02	70.57	78.78	87.71
508			39.84	42.31	44.78	47.25	49.72	54.27	55.87	59.32	62.02	63.98	66.93	68.89	69.38	74.52	77.95	78.56	87.71	97.68
		559	43.86	46.59	49.31	52.03	54.75	59.77	61.54	65.33	68.31	70.48	73.72	75.89	76.43	82.1	85.87	86.55	96.64	107.64
610			47.89	50.86	53.84	56.81	59.78	65.27	67.2	71.34	74.6	76.97	80.52	82.87	83.47	89.67	93.8	94.53	105.57	117.6
		660					64.71	70.66	72.75	77.24	80.77	83.33	87.17	89.74	90.38	97.09	101.56	102.36	114.32	127.36
711							69.74	76.15	78.11	83.25	87.06	90.82	93.97	96.72	97.42	104.66	109.49	110.35	123.25	137.32
	762						74.77	81.65	84.06	89.25	93.34	96.31	100.75	103.72	104.46	112.23	117.41	118.34	132.18	147.29
813							79.80	87.15	89.72	95.27	99.63	102.8	107.55	110.71	111.51	119.81	125.33	126.32	141.11	157.25
		864					84.84	92.64	95.38	101.29	105.92	109.29	114.34	117.71	118.55	127.38	133.26	134.31	150.04	167.21
914							89.76	98.03	100.03	107.18	112.09	115.65	121	124.56	125.45	134.8	141.03	142.14	158.8	176.96
		965					94.80	103.53	106.59	113.19	118.38	122.14	127.79	131.55	132.5	142.37	148.95	150.13	167.73	186.94

续表

系列			壁厚（mm）																		
系列 1			8		8.8		10		11		12.5		14.2		16		17.5		20		
系列 2				8.74		9.53		10.31		11.91		12.7		15.09		16.66		19.05		20.62	
外径（mm）			单位长度理论质量（kg/m）																		
系列 1	系列 2	系列 3																			
		165	30.97	33.68																	
168.3			31.62	34.39	34.61	37.31	39.04	40.17	42.67	45.93	48.03	48.73									
		177.8	33.5	36.44	36.67	39.55	41.38	42.59	45.25	48.72	50.96	51.71									
		190.7	36.05	39.22	39.48	42.58	44.56	45.86	48.75	52.51	54.93	55.75									
		193.7	36.64	39.87	40.13	43.28	45.30	46.63	49.56	53.39	55.85	56.69									
219.1			41.65	45.34	45.64	49.25	51.51	53.08	56.45	60.86	63.68	64.64	71.75								
		244.5	46.66	50.82	51.15	55.22	57.83	59.54	63.34	68.31	71.51	72.6	80.64								
273.1			52.3	56.98	57.36	61.95	64.88	66.81	71.1	76.71	80.33	81.56	90.66								
323.9			62.34	67.93	68.38	73.88	77.41	79.73	84.88	91.64	93.99	97.47	108.45	114.92	121.49	126.23	132.23				
355.6			68.58	74.76	75.26	81.33	85.22	87.79	93.48	100.95	105.76	107.39	119.55	126.71	134	139.26	145.92				
406.4			78.6	85.71	86.29	93.27	97.75	100.71	107.26	115.87	121.43	123.3	137.34	145.61	154.05	160.13	167.84	181.98	190.58	195.18	
457			88.58	96.62	97.27	105.17	110.24	113.57	120.98	130.72	130.02	139.15	155.06	164.44	174	180.93	189.68	205.75	215.54	221.91	
508			98.65	107.61	108.34	117.15	122.81	126.53	134.82	145.7	152.74	155.12	172.91	183.42	194.14	201.87	211.69	229.71	240.7	247.84	
		559	108.71	118.61	119.41	129.14	135.39	139.51	148.56	160.69	168.47	171.1	190.79	202.41	214.26	222.83	233.7	253.67	265.85	273.78	
610			118.77	129.6	130.47	141.12	147.96	152.48	162.49	175.67	184.19	187.07	208.65	221.39	234.68	243.78	255.71	277.63	291.01	299.71	
		660	128.63	140.37	141.32	152.88	160.30	165.19	176.06	190.34	199.6	202.21	225.15	240	254.11	264.32	277.29	301.12	315.67	325.14	
711			138.7	151.37	152.39	164.86	172.88	178.16	189.89	205.34	215.33	218.71	244.04	258.98	274.24	285.28	299.3	325.08	340.82	351.07	
	762		148.76	162.36	163.46	176.85	185.45	191.12	203.73	220.88	231.03	234.68	261.87	277.96	294.36	306.23	321.31	349.04	365.98	377.01	
813			158.82	173.36	174.53	188.83	198.03	204.09	217.56	235.29	246.77	250.65	279.73	296.94	314.48	327.18	343.32	373	391.13	402.94	
		864	168.88	184.34	185.6	200.82	210.61	217.06	231.4	250.27	262.49	266.63	297.59	315.92	334.61	348.14	365.33	396.96	416.29	428.88	
914			178.75	195.12	196.45	212.57	222.94	229.77	244.96	264.96	277.9	282.29	315.1	334.52	354.34	368.68	386.91	420.45	440.95	454.3	
		965	188.81	206.11	207.52	224.56	235.52	242.74	258.8	279.94	293.63	298.26	332.56	353.5	374.46	389.64	408.92	444.41	466.1	480.24	

续表

系列			壁厚（mm）																	
系列1			22.2		25		28		30		32		36		40	45	50	55	60	65
系列2				23.83		26.19		28.58		30.96		34.93		38.1						
外径（mm）			单位长度理论质量（kg/m）																	
系列1	系列2	系列3																		
		165																		
168.3																				
		177.8																		
		190.7																		
		193.7																		
219.1																				
		244.5																		
273.1																				
323.9																				
355.6																				
406.4			210.34	224.83	235.15	245.57	261.29	266.3	278.48											
457			238.05	254.57	266.31	278.25	296.23	301.96	315.91											
508			265.97	283.54	297.79	311.19	331.45	337.91	353.65	364.23	375.64	407.51	419.05	441.52	461.66	513.82	564.75	614.44	662.9	710.12
		559	293.89	314.51	329.23	344.13	366.67	373.85	391.37	403.17	415.89	451.45	454.33	489.44	511.97	570.42	627.64	683.62	738.37	791.88
610			321.81	344.48	360.07	377.07	401.88	409.8	429.11	442.11	455.14	459.36	509.61	537.36	562.28	627.02	690.52	752.79	813.83	873.63
		660	349.19	373.87	391.5	409.37	436.41	445.04	466.1	480.28	495.6	538.45	554	584.34	611.61	682.51	752.18	820.61	887.81	953.78
711			377.11	403.84	422.94	442.31	471.63	480.99	503.83	519.22	535.85	582.38	599.27	632.26	661.91	739.11	815.06	889.79	963.28	1035.54
	762		405.03	433.81	454.39	475.25	506.84	516.93	541.57	558.16	575.09	526.32	644.55	680.18	712.22	795.7	877.95	958.95	1038.74	1117.29
813			432.95	463.78	485.83	508.19	542.06	552.88	579.3	597.1	615.34	670.25	689.83	728.1	762.53	852.3	940.84	1028.14	1114.21	1199.04
		864	460.87	493.75	517.27	541.13	577.28	588.83	617.03	636.04	656.59	714.18	735.11	776.02	812.84	908.9	1003.72	1097.31	1189.61	1280.22
914			488.25	523.14	548.1	573.42	611.80	624.07	654.02	674.22	696.05	757.25	779.5	823	862.17	964.39	1065.38	1165.13	1263.66	1360.94
		965	516.17	553.11	579.55	606.36	647.02	660.01	691.76	713.16	736.29	801.19	824.78	870.92	912.48	1020.99	1128.26	1234.01	1339.12	1442.7

续表

系列			壁厚（mm）																		
系列 1			3.2		3.6		4.0		4.5		5.0		5.4		5.6		6.3		7.1		
系列 2				3.4		3.8		4.37		4.78		5.16		5.56		6.02		6.35		7.92	
外径（mm）			单位长度理论质量（kg/m）																		
系列 1	系列 2	系列 3																			
1016							99.830	109.02	112.25	119.2	124.66	128.63	134.58	138.55	139.54	149.94	156.87	158.11	176.66	196.9	
1067											130.95	135.12	141.38	145.54	146.58	157.52	164.8	166.1	185.58	206.86	
1118											137.24	141.61	148.17	152.54	153.63	165.09	172.72	174.08	194.51	216.82	
	1168										143.41	147.98	154.83	159.39	160.53	172.51	180.49	181.91	203.27	226.59	
1219											149.7	154.47	161.62	166.38	167.58	180.08	188.41	189.9	212.2	236.55	
	1321														181.66	195.22	204.26	205.87	230.06	256.47	
1422															195.61	210.22	219.95	221.69	247.74	276.2	
	1524																235.8	237.65	265.6	296.12	
1626																	251.65	253.61	283.46	316.04	
	1727																		301.15	335.77	
1829																			319.01	355.69	
	1930																				
2032																					
	2134																				
2235																					
	2337																				
	2438																				
2540																					

续表

系列			壁厚（mm）																	
系列 1			8		8.8		10		11		12.5		14.2		16		17.5		20	
系列 2				8.74		9.53		10.31		11.91		12.7		15.09		16.66		19.05		20.62
外径（mm）			单位长度理论质量（kg/m）																	
系列 1	系列 2	系列 3																		
1016			198.87	217.11	218.58	236.54	248.09	255.71	272.63	294.92	309.35	314.23	350.82	372.48	394.58	410.59	430.93	468.37	491.26	506.17
1067			208.93	228.1	229.65	248.53	260.67	268.67	286.47	309.9	325.07	330.21	368.68	393.46	414.71	431.54	452.94	492.33	516.41	532.11
1118			218.99	239.09	240.72	260.52	273.25	281.64	300.3	324.88	340.79	346.18	386.64	410.44	434.83	452.5	474.95	516.29	541.57	558.04
	1168		228.85	249.87	251.57	272.27	285.58	294.35	313.87	339.56	356.2	361.84	404.05	429.05	454.56	473.04	496.53	539.78	566.23	583.47
1219			238.92	260.87	262.64	284.25	298.16	307.32	327.7	354.54	371.93	377.81	421.91	448.03	474.68	493.99	518.54	563.74	591.38	609.4
	1321		259.04	282.85	284.78	308.23	323.31	333.26	355.37	384.5	403.37	409.76	457.63	485.98	514.93	535.9	562.56	611.66	641.69	661.27
1422			278.97	304.62	306.69	331.96	348.22	358.94	382.77	414.17	434.5	441.39	493	523.57	554.79	577.4	606.15	659.11	691.51	712.63
	1524		299.09	326.6	328.83	355.94	373.38	384.87	410.44	444.13	465.95	473.34	528.72	561.53	595.03	619.31	650.17	707.03	741.82	764.5
1626			319.22	348.59	350.97	379.91	398.53	410.81	438.11	474.09	497.39	505.29	564.44	599.49	635.28	661.21	694.19	754.95		
	1727		339.14	370.36	372.89	403.55	423.44	436.49	465.51	503.75	528.53	536.92	599.81	637.07	675.13	702.71	737.78	802.4		
1829			359.27	392.34	395.02	427.62	448.59	462.42	493.18	533.71	559.97	568.87	635.53	675.03	715.38	744.62	781.8	850.32		
	1930		379.2	414.11	416.94	451.36	473.50	488.1	520.58	563.38	591.11	600.5	670.9	712.62	755.23	786.12	825.39	897.77		
2032			399.32	436.1	439.08	475.33	498.65	514.04	548.25	593.34	622.55	632.45	706.62	750.58	795.48	828.02	869.41	945.69	992.38	1022.83
	2134				461.21	499.3	523.81	539.97	575.92	623.3	653.99	664.39	742.34	788.54	835.73	869.93	913.43	993.61	1042.69	1074.7
2235					483.13	523.04	548.72	565.65	603.32	652.96	685.13	696.03	777.71	826.12	875.58	911.43	957.02	1041.06	1092.5	1126.06
	2337						573.87	591.58	630.99	682.92	716.57	727.97	813.43	864.08	915.93	953.34	1001.04	1088.98	1142.81	1177.33
	2438						598.78	617.26	658.39	712.59	747.71	759.61	848.8	901.67	955.68	994.83	1044.63	1136.43	1192.63	1219.29
2540							623.94	643.2	686.06	742.55	779.15	791.55	884.52	939.63	995.93	1036.74	1088.55	1184.35	1242.94	1821.16

续表

系列			壁厚（mm）																		
系列 1			22.2		25		28		30		32		36		40	45	50	55	60	65	
系列 2				23.83		26.19		28.58		30.96		34.93		38.1							
外径（mm）			单位长度理论质量（kg/m）																		
系列 1	系列 2	系列 3																			
1016			544.09	583.08	610.99	639.3	682.24	695.96	729.49	752.1	776.54	845.12	870.06	918.84	962.78	1077.56	1191.15	1303.48	1414.58	1524.45	
1067			572.01	613.05	642.43	672.24	717.45	731.91	767.22												
1118																					
	1168																				
1219																					
	1321																				
1422																					
	1524																				
1626																					
	1727																				
1829																					
	1930																				
2032																					
	2134																				
2235																					
	2337																				
	2438																				
2540																					

（2）长度。

1）通常长度：

外径≤30mm　　4000～6000m

外径＞30～70mm　　4000～8000m

外径＞70mm　　4000～12000mm

按通常长度交货时，每批钢管可交付数量不超过该批钢管交货总数量 5%的，长度不小于 2000mm 的短尺钢管。

2）定尺长度、倍尺长度。定尺长度和倍尺总长度在通常长度范围内。倍尺长度按每倍尺留 5～10mm 切口余量。

（3）钢管按理论质量或实际质量交货。钢的密度为 7.85kg/dm³。按公式计算如式（F-2）。

$$W=0.0246615\times(D-t)\times t \tag{F-2}$$

式中　W——钢管的每米理论质量，kg/m；

D——钢管的外径，mm；

t——钢管的壁厚，mm。

F.3.1.2　牌号和化学成分

钢管应用 GB/T 699 中的 08、10、15、20，GB/T 700 中的 Q195、Q215A、Q215B、Q235A、Q235B、Q235C 和 GB/T 1591 中的 Q295A、Q295B、Q345A、Q345B、Q345C 的规定。钢的化学成分（熔炼成分）应符合相应标准的规定，经供需双方协议也可供应其他易焊接钢牌号的钢管。

F.3.1.3　制造方法

钢管应以热轧钢带、冷轧钢带电阻焊接或焊后冷、热加工方法制造。需方指定某一种制造方法时，应在合同中注明。

F.3.1.4　力学性能

钢管的力学性能应符合表 F-12 的规定。

表 F-12　　钢管的力学性能

牌号	下屈服强度[a] R_{eL}（MPa）	抗拉强度 R_m（MPa）	断后伸长率 A/%	
			D≤168.3mm	D＞168.3mm
	不小于			
08、10	195	315	22	
15	215	355	20	
20	235	390	19	
Q195[b]	195	315	15	20
Q215A，Q215B	215	335		
Q235A，Q235B，Q235C	235	370		
Q275A、Q275B、Q275C	275	410	13	18
Q345A，Q345B，Q345C	345	470		
Q390A、Q390B、Q390C	390	490	19	
Q420A、Q420B、Q420C	420	520	19	
Q460C、0460D	460	550	17	

[a] 当屈服不明显时，可测量 $R_{p0.2}$ 或 $R_{t0.5}$ 代替下屈服强度。

[b] Q195 的屈服强度值仅作为参考，不作交货条件。

F.3.2　低压流体输送用焊接钢管

GB/T 3091—2015 适用于水、污水、燃气、空气、采暖蒸汽等低压流体输送用和其他结构用的直缝焊接钢管，根据需要摘录如下。

F.3.2.1　尺寸、外形、质量

（1）外径和壁厚。

1）公称外径不大于 168.3mm 的钢管，其公称口径、公称外径、公称壁厚及理论质量应符合表 F-13 的规定。

表 F-13　　钢管的公称口径、公称外径、公称壁厚及理论质量

公称口径（mm）	公称外径（mm）	普通钢管		加厚钢管	
		公称壁厚（mm）	理论质量（kg/m）	公称壁厚（mm）	理论质量（kg/m）
6	10.2	2.0	0.40	2.5	0.47
8	13.5	2.5	0.68	2.8	0.74
10	17.2	2.5	0.91	2.8	0.99
15	21.3	2.8	1.28	3.5	1.54
20	26.9	2.8	1.66	3.5	2.02
25	33.7	3.2	2.41	4	2.93
32	42.4	3.5	3.36	4	3.79
40	48.3	3.5	3.87	4.5	4.86
50	60.3	3.8	5.29	4.5	6.19
65	76.1	4	7.11	4.5	7.95
80	88.9	4	8.38	5	10.35
100	114.3	4	10.88	5	13.48
125	139.7	4	13.39	5.5	18.2
150	165.1	4.5	18.18	6	24.02

注　1. 表 F-13 中的公称口径系近似内径的名义尺寸，不表示公称外径减去两个公称壁厚所得的内径。

2. 根据需方要求，经供需双方协议，并在合同中注明，可供表 F-13 中规定以外尺寸的钢管。

2）公称外径大于 168.3mm 的钢管，其公称外径、公称壁厚及理论重量应符合表 F-14 的规定。

表 F-14　　钢管的公称外径、公称壁厚及理论质量

公称外径（mm）	公称壁厚（mm）														
	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	8	9	10	11	12.5	14	15	16
	理论质量（kg/m）														
177.8	17.14	19.23	21.31	23.37	25.42										
193.7	18.71	21.00	23.27	25.53	27.77										
219.1	21.22	23.82	26.40	28.97	31.53	34.08	36.61	41.65	46.63	51.57					
244.5	23.72	26.63	29.53	32.42	35.29	38.15	41.00	46.66	52.27	57.83					
273.0			33.05	36.28	39.51	42.72	45.92	52.28	58.60	64.86					
323.9			39.32	43.19	47.04	50.88	54.71	62.32	69.89	77.41	84.88	95.99			
355.6				47.49	51.73	55.96	60.18	68.58	76.93	85.23	93.48	105.77			
406.1				54.38	59.25	64.10	68.95	78.60	88.20	97.76	107.26	121.43			
457.2				61.27	66.76	72.25	77.72	88.62	99.48	110.29	121.04	137.09			
508				67.16	74.28	80.39	86.49	98.65	110.75	122.81	134.82	152.75			
559				75.08	81.83	88.57	95.29	108.71	122.07	135.39	148.66	168.47	188.17	201.24	214.26
610				81.99	89.37	96.74	104.10	118.77	133.39	147.97	162.49	184.19	205.78	220.1	234.38

续表

公称外径（mm）	公称壁厖（mm）															
	6	6.5	7	8	9	10	11	13	14	15	16	18	19	20	22	25
	理论质量（kg/m）															
660	96.77	104.76	112.73	128.63	144.49	160.30	176.06	207.43	223.04	238.60	254.11	284.99	300.35	315.67	346.15	391.50
711	104.32	112.93	121.53	138.70	155.81	172.88	189.89	223.78	240.65	257.47	274.24	307.63	324.25	340.82	373.82	422.94
762	111.86	121.11	130.34	148.76	167.13	185.45	203.73	241.13	258.26	276.33	294.36	330.27	348.15	365.98	401.49	454.39
813	119.41	129.28	139.14	158.82	178.45	198.03	217.56	256.48	275.86	295.20	314.48	352.91	372.04	391.13	429.16	485.83
864	126.96	137.46	147.94	168.88	189.77	210.61	231.40	272.83	293.47	314.06	334.61	375.55	395.94	416.29	456.80	517.27
914	134.36	145.47	156.58	178.75	200.87	222.94	244.96	288.86	310.73	332.56	354.34	397.74	419.37	440.95	483.96	548.10
1016	149.45	161.82	174.18	198.87	223.51	248.09	272.63	321.56	345.95	370.29	394.58	443.02	467.16	491.26	539.30	610.99
1067	157.00	170.00	182.99	208.93	234.83	260.67	286.47	337.91	363.56	389.16	414.71	465.66	491.06	516.41	566.97	642.43
1118	164.54	178.17	191.79	218.99	246.15	273.25	300.30	354.26	381.17	408.02	434.83	488.30	514.96	541.57	594.64	673.88
1168	171.94	186.19	200.42	228.86	257.24	285.58	313.87	370.29	398.43	426.52	454.56	510.49	538.39	566.23	621.77	704.7
1219	179.49	194.36	209.23	238.92	268.56	298.16	327.70	386.64	416.04	445.39	474.68	533.13	562.28	591.38	649.44	736.15
1321	194.58	210.71	226.84	259.04	291.20	323.31	355.37	419.34	451.26	483.12	514.93	578.41	610.08	641.69	704.78	799.03
1422	209.52	226.90	244.27	278.97	313.62	348.22	382.77	451.72	486.13	520.48	554.79	623.25	657.4	691.51	759.57	861.3
1524	224.62	243.25	261.88	299.09	336.26	373.38	410.44	484.43	521.34	558.21	595.03	668.52	705.2	741.82	814.91	924.19
1626	239.71	259.61	279.49	319.22	358.90	398.53	438.11	517.13	556.56	595.95	635.28	713.8	752.99	792.13	870.26	987.08

注　根据需方要求，经供需双方协议，并在合同中注明，可供表 F-14 中规定以外尺寸的钢管。

3）钢管外径、壁厚的允许偏差应符合表 F-15 的规定。

表 F-15　钢管外径、壁厚的允许偏差

公称外径 D（mm）	管体外径允许偏差	管端外径允许偏差（mm，距管端 100mm 范围内）	壁厚允许偏差
D≤48.3	±0.5mm	—	±10%
48.3<D≤168.3	±1.0%	—	
168.3<D≤508	±0.75%	+2.4 -0.8	
D>508	±1.0%或±10.0，两者取较小值	+3.2 -0.8	

（2）长度。

1）通常长度。钢管的通常长度为 3000～12000mm。

2）定尺长度钢管的定尺长度应在通常长度范围内，直缝高频电焊钢管的定尺长度允许偏差为 0～15mm；埋弧焊钢管的定尺长度允许偏差为 0～50mm。

3）倍尺长度钢管的倍尺长度应在通常长度范围内，直缝高频电焊钢管的定尺长度允许偏差为 0～15mm；埋弧焊钢管的定尺长度允许偏差为 0～50mm，每个倍尺应留出 5～10mm 的切口余量。

（3）质量。

1）未镀锌钢管按实际质量交货，也可按理论质量交货。未镀锌钢管每米理论质量按式（F-3）计算（钢的密度为 7.85kg/dm^3）。

$$W=0.0246615\times(D-t)\times t \quad \text{(F-3)}$$

式中　W——钢管的每米理论质量，kg/m；

D——钢管的公称外径，mm；

t——钢管的公称壁厚，mm。

2）镀锌钢管以实际质量交货，也可按理论质量交货。镀锌钢管的每米理论质量（钢的密度为 7.85kg/dm^3）按式（F-4）计算。

$$W=CW_1 \quad \text{(F-4)}$$

式中　W——镀锌钢管的每米理论质量，kg/m；

C——镀锌层的质量系数，见表 F-16；

W_1——钢管镀锌前的每米理论质量，kg/m。

表 F-16 镀锌层的质量系数

镀锌层 300g/m² 的质量系数										
公称壁厚/mm	2	2.0	2.3	2.5	2.8	2.9	3.0	3.2	3.5	3.6
系数 *c*	1.038	1.035	1.033	1.031	1.027	1.026	1.025	1.024	1.022	1.021
公称壁厚/mm	3.8	4.0	4.5	5.0	5.4	5.5	5.6	6.0	6.3	7.0
系数 *c*	1.020	1.019	1.017	1.015	1.014	1.014	1.014	1.013	1.012	1.011
公称壁厚/mm	7.1	8.0	8.8	10	11	12.5	14.2	15	17.5	20
系数 *c*	1.011	1.010	1.009	1.008	1.007	1.006	1.005	1.005	1.004	1.004
镀锌层 500g/m² 的质量系数										
公称壁厚/mm	2	2.0	2.3	2.5	2.8	2.9	3.0	3.2	3.5	3.6
系数 *c*	1.064	1.058	1.055	1.051	1.045	1.044	1.042	1.040	1.036	1.035
公称壁厚/mm	3.8	4.0	4.5	5.0	5.4	5.5	5.6	6.0	6.3	7.0
系数 *c*	1.034	1.032	1.028	1.025	1.024	1.023	1.023	1.021	1.020	1.018
公称壁厚/mm	7.1	8.0	8.8	10	11	12.5	14.2	15	17.5	20
系数 *c*	1.018	1.016	1.014	1.013	1.012	1.010	1.009	1.008	1.007	1.006

（4）标记示例。

用 Q235B 沸腾钢制造的公称外径为 323.9mm，公称壁厚为 7.0mm，长度为 12000mm 的电阻焊钢管，其标记为：Q235B •F323.9×7.0×12000 ERW GB/T 3091—2001。

用 Q345B 钢制造的公称外径为 1016mm，公称壁厚为 9.0mm，长度为 12000mm 的埋弧焊钢管，其标记为：Q345B 1016×9.0×12000 SAW GB/T 3091—2001。

用 Q345B 钢制造的公称外径为 88.9mm，公称壁厚为 4.0mm，长度为 12000mm 的镀锌电阻焊钢管，其标记为：Q345B • Zn 88.9×4.0×12000ERW GB/T 3091—2001。

F.3.2.2 技术要求

（1）牌号和化学成分。

1）牌号。钢管用钢的牌号和化学成分（熔炼分析）应符合 GB/T 700 中 Q215A、Q215B、Q235A、Q235B 和 GB/T 1591 中 Q295A、Q295B、Q345A、Q345B 的规定。经供需双方协议，可供应其他牌号的钢管。

2）化学成分按熔炼成分验收。当需方要求进行成品分析时，应在合同中注明。成品化学成分的允许偏差应符合 GB/T 222 中的有关规定。

（2）制造工艺钢管采用直缝高频电焊、直缝埋弧焊或螺旋缝埋弧焊中的任一种工艺制造。

（3）交货状态。

1）钢管按焊接状态交货。根据需方要求，经供需双方协议，并在合同中注明，钢管可按焊缝热处理状态交货，也可按整体热处理状态交货。

2）公称外径不大于 508mm 的钢管可镀锌交货，也可按其他保护层交货。

（4）力学性能。

1）钢管的力学性能应符合表 F-17 的规定。

2）采用其他牌号制造的钢管，其力学性能指标由供需双方协商规定。

表 F-17 钢管的力学性能

牌号	下屈服强度 R_{eL}（MPa，不小于）		抗拉强度 R_m（MPa，不小于）	断后伸长率 *A*（%，不小于）	
	$t \leq 16mm$	$t > 16mm$		$D \leq 168.3mm$	$D > 168.3mm$
Q195[a]	195	185	315	15	20
Q215A、Q215B	215	205	335		
Q235A、Q235B	235	225	370		
Q275A、Q275B	275	265	410	13	18
Q345A、Q345B	345	325	470		

[a] Q195 的屈服强度值仅作为参考，不做交货条件。

F.3.3 结构用无缝钢管

GB/T 8162—2018 适用于一般结构、机械结构用无缝钢管。按材质不同，分优质碳素结构钢、低合金结构钢和合金结构钢。优质碳素结构钢和低合金结构钢无缝钢管一般以热轧状态交货，屈服点按钢管壁厚分挡组距，便于根据结构的不同需要合理选材，主要用于一般结构件或对性能要求不高的机械零件。合金结构钢无缝钢管以热轧或热处理状态交货，经调质热处理有较高的综合力学性能，常用于制造尺寸较大的、对性能要求较高的重要机械零件。相关内容摘录如下。

F.3.3.1 规格、尺寸

（1）外径和壁厚。

钢管的外径和壁厚分为三类：普通钢管的外径和壁厚（见表 F-18）、精密钢管的外径和壁厚（见表 F-19）和不锈钢管的外径和壁厚（见表 F-20）。

钢管的外径分为三个系列：系列 1、系列 2 和系列 3。系列 1 是通用系列，属推荐选用系列；系列 2 是非通用系列；系列 3 是少数特殊、专用系列。

表 F-18　　普通钢管的外径和壁厚及单位长度理论质量

外径（mm）			壁厚（mm）															
系列 1	系列 2	系列 3	0.25	0.30	0.40	0.50	0.60	0.80	1.0	1.2	1.4	1.5	1.6	1.8	2.0	2.2（2.3）	2.5（2.6）	2.8
			单位长度理论质量 [a]（kg/m）															
	6		0.035	0.042	0.055	0.068	0.080	0.103	0.123	0.142	0.159	0.166	0.174	0.186	0.197			
	7		0.042	0.050	0.065	0.080	0.095	0.122	0.148	0.172	0.193	0.203	0.213	0.231	0.247	0.260	0.277	
	8		0.048	0.057	0.075	0.092	0.109	0.142	0.173	0.201	0.228	0.240	0.253	0.275	0.296	0.315	0.339	
	9		0.054	0.064	0.085	0.105	0.124	0.162	0.197	0.231	0.262	0.277	0.292	0.320	0.345	0.369	0.401	0.428
10（10.2）			0.060	0.072	0.095	0.117	0.139	0.182	0.222	0.260	0.297	0.314	0.331	0.364	0.395	0.423	0.462	0.497
	11		0.066	0.079	0.105	0.129	0.154	0.201	0.247	0.290	0.331	0.351	0.371	0.408	0.444	0.477	0.524	0.566
	12		0.072	0.087	0.114	0.142	0.169	0.221	0.271	0.320	0.366	0.388	0.410	0.453	0.493	0.532	0.586	0.635
	13（12.7）		0.079	0.094	0.124	0.164	0.183	0.241	0.296	0.349	0.401	0.425	0.450	0.497	0.543	0.586	0.647	0.704
13.5			0.082	0.098	0.129	0.160	0.191	0.251	0.308	0.364	0.418	0.444	0.470	0.519	0.567	0.613	0.678	0.739
		14	0.085	0.101	0.134	0.166	0.198	0.260	0.321	0.379	0.435	0.462	0.489	0.542	0.592	0.640	0.709	0.773
	16		0.097	0.116	0.154	0.191	0.228	0.300	0.370	0.438	0.504	0.536	0.568	0.630	0.691	0.749	0.832	0.911
17（17.2）			0.103	0.124	0.164	0.203	0.243	0.320	0.395	0.468	0.539	0.573	0.608	0.675	0.740	0.803	0.894	0.981
		18	0.109	0.131	0.174	0.216	0.257	0.339	0.419	0.497	0.573	0.610	0.647	0.719	0.789	0.857	0.956	1.05
	19		0.116	0.138	0.183	0.228	0.272	0.359	0.444	0.527	0.608	0.647	0.687	0.764	0.838	0.911	1.02	1.12
	20		0.122	0.146	0.193	0.240	0.287	0.879	0.469	0.556	0.642	0.684	0.726	0.808	0.888	0.966	1.08	1.19
21（21.3）					0.203	0.253	0.302	0.399	0.493	0.586	0.677	0.721	0.765	0.852	0.937	1.02	1.14	1.26
		22			0.213	0.265	0.317	0.418	0.518	0.616	0.711	0.758	0.805	0.897	0.986	1.07	1.20	1.33
	25				0.243	0.302	0.361	0.477	0.592	0.704	0.815	0.869	0.923	1.03	1.13	1.24	1.39	1.53
		25.4			0.247	0.307	0.367	0.485	0.602	0.716	0.829	0.884	0.939	1.05	1.15	1.26	1.41	1.56
27（26.9）					0.262	0.327	0.391	0.517	0.641	0.764	0.884	0.943	1.00	1.12	1.23	1.35	1.51	1.67
	28				0.272	0.339	0.405	0.537	0.666	0.793	0.918	0.980	1.04	1.16	1.28	1.40	1.57	1.74

续表

外径（mm）			壁厚（mm）															
系列 1	系列 2	系列 3	(2.9) 3.0	3.2	3.5 (3.6)	4.0	4.5	5.0	(5.4) 5.5	6.0	(6.3) 6.5	7.0 (7.1)	7.5	8.0	8.5	(8.8) 9.0	9.5	10
			单位长度理论质量 a（kg/m）															
	6																	
	7																	
	8																	
	9																	
10 (10.2)			0.518	0.537	0.561													
	11		0.592	0.616	0.647													
	12		0.666	0.694	0.734	0.789												
	13 (12.7)		0.740	0.773	0.820	0.888												
13.5			0.777	0.813	0.863	0.937												
		14	0.814	0.852	0.906	0.986												
	16		0.962	1.01	1.08	1.18	1.28	1.36										
17 (17.2)			1.04	1.09	1.17	1.28	1.39	1.48										
		18	1.11	1.17	1.25	1.38	1.50	1.60										
	19		1.18	1.25	1.34	1.48	1.61	1.73	1.83	1.92								
	20		1.26	1.33	1.42	1.58	1.72	1.85	1.97	2.07								
21 (21.3)			1.33	1.40	1.51	1.68	1.83	1.97	2.10	2.22								
		22	1.41	1.48	1.60	1.78	1.94	2.10	2.24	2.37								
	25		1.63	1.72	1.86	2.07	2.28	2.47	2.64	2.81	2.97	3.11						
		25.4	1.66	1.75	1.89	2.11	2.32	2.52	2.70	2.87	3.03	3.18						
27 (26.9)			1.78	1.88	2.03	2.27	2.50	2.71	2.92	3.11	3.29	3.45						
	28		1.85	1.96	2.11	2.37	2.61	2.84	3.05	3.26	3.45	3.63						

外径（mm）			壁厚（mm）															
系列 1	系列 2	系列 3	0.25	0.30	0.40	0.50	0.60	0.80	1.0	1.2	1.4	1.5	1.6	1.8	2.0	2.2 (2.3)	2.5 (2.6)	2.8
			单位长度理论质量 a（kg/m）															
		30			0.292	0.364	0.435	0.576	0.715	0.852	0.987	1.05	1.12	1.25	1.38	1.51	1.70	1.88
	32 (31.8)				0.312	0.388	0.465	0.616	0.765	0.911	1.06	1.13	1.20	1.34	1.48	1.62	1.82	2.02
34 (33.7)					0.331	0.413	0.494	0.655	0.814	0.971	1.13	1.20	1.28	1.43	1.58	1.73	1.94	2.15
		35			0.341	0.425	0.509	0.675	0.838	1.00	1.16	1.24	1.32	1.47	1.63	1.78	2.00	2.22
	38				0.371	0.462	0.553	0.734	0.912	1.09	1.26	1.35	1.44	1.61	1.78	1.94	2.19	3.43
	40				0.391	0.487	0.583	0.773	0.962	1.15	1.33	1.42	1.52	1.70	1.87	2.05	2.31	2.57
42 (42.4)									1.01	1.21	1.40	1.50	1.59	1.78	1.97	2.16	2.44	2.71

续表

外径（mm）			壁厚（mm）															
系列 1	系列 2	系列 3	0.25	0.30	0.40	0.50	0.60	0.80	1.0	1.2	1.4	1.5	1.6	1.8	2.0	2.2 (2.3)	2.5 (2.6)	2.8
			单位长度理论质量[a]（kg/m）															
		45 (44.5)							1.09	1.30	1.51	1.61	1.71	1.92	2.12	2.32	2.62	2.91
48 (48.3)									1.16	1.38	1.61	1.72	1.83	2.05	2.27	2.48	2.81	3.12
	51								1.23	1.47	1.71	1.83	1.95	2.18	2.42	2.65	2.99	3.33
		54							1.31	1.56	1.82	1.94	2.07	2.32	2.56	2.81	3.18	3.54
	57								1.38	1.65	1.92	2.05	2.19	2.45	2.71	2.97	3.36	3.74
60 (60.3)									1.46	1.74	2.02	2.16	2.30	2.58	2.86	3.14	3.55	3.95
	63 (63.5)								1.53	1.83	2.18	2.28	2.42	2.72	3.01	3.30	3.73	4.16
	65								1.58	1.89	2.20	2.35	2.50	2.81	3.11	3.41	3.85	4.30
	68								1.65	1.98	2.30	2.46	2.62	2.94	3.26	3.57	4.04	4.50
	70								1.70	2.04	2.37	2.53	2.70	3.03	3.35	3.68	4.16	4.64
		73							1.78	2.12	2.47	2.64	2.82	3.16	3.50	3.84	4.35	4.85
76 (76.1)									1.85	2.21	2.58	2.76	2.94	3.29	3.65	4.00	4.53	5.05
	77										2.61	2.79	2.98	3.34	3.70	4.06	4.59	5.12
	80										2.71	2.90	3.09	3.47	3.85	4.22	4.78	5.33

外径（mm）			壁厚（mm）															
系列 1	系列 2	系列 3	(2.9) 3.0	3.2	3.5 (3.6)	4.0	4.5	5.0	(5.4) 5.5	6.0	(6.3) 6.5	7.0 (7.1)	7.5	8.0	8.5	(8.8) 9.0	9.5	10
			单位长度理论质量[a]（kg/m）															
		30	2.00	2.11	2.29	2.56	2.83	3.08	3.32	3.55	3.77	3.97	4.16	4.34				
	32 (31.8)		2.15	2.27	2.46	2.76	3.05	3.33	3.59	3.85	4.09	4.32	4.53	4.74				
34 (33.7)			2.29	2.43	2.63	2.96	3.27	3.58	3.87	4.14	4.41	4.66	4.90	5.13				
		35	2.37	2.51	2.72	3.06	3.38	3.70	4.00	4.29	4.57	4.83	5.09	5.33	5.56	5.77		
	38		2.59	2.75	2.98	3.35	3.72	4.07	4.41	4.74	5.05	5.35	5.64	5.92	6.18	6.44	6.68	6.91
	40		2.74	2.90	3.15	3.55	3.94	4.32	4.68	5.03	5.37	5.70	6.01	6.31	6.60	6.88	7.15	7.40
42 (42.4)			2.89	3.06	3.32	3.75	4.16	4.56	4.95	5.33	5.69	6.04	6.38	6.71	7.02	7.32	7.61	7.89
		45 (44.5)	3.11	3.30	3.58	4.04	4.49	4.93	5.36	5.77	6.17	6.56	6.94	7.30	7.65	7.99	8.32	8.63
48 (48.3)			3.33	3.54	3.84	4.34	4.83	5.30	5.76	6.21	6.65	7.08	7.49	7.89	8.28	8.66	9.02	9.37
	51		3.55	3.77	4.10	4.64	5.16	5.67	6.17	6.66	7.13	7.60	8.05	8.48	8.91	9.32	9.72	10.11
		54	3.77	4.01	4.36	4.93	5.49	6.04	6.58	7.10	7.61	8.11	8.60	9.08	9.54	9.99	10.43	10.85
	57		4.00	4.25	4.62	5.23	5.83	6.41	6.99	7.55	8.10	8.63	9.16	9.67	10.17	10.65	11.13	11.59

续表

外径（mm）			壁厚（mm）															
系列 1	系列 2	系列 3	(2.9) 3.0	3.2	3.5 (3.6)	4.0	4.5	5.0	(5.4) 5.5	6.0	(6.3) 6.5	7.0 (7.1)	7.5	8.0	8.5	(8.8) 9.0	9.5	10
			单位长度理论质量 [a]（kg/m）															
60 (60.3)			4.22	4.48	4.88	5.52	6.16	6.78	7.39	7.99	8.58	9.15	9.71	10.26	10.80	11.32	11.83	12.33
	63 (63.5)		4.44	4.72	5.14	5.82	6.49	7.15	7.80	8.43	9.06	9.67	10.27	10.85	11.42	11.99	12.53	13.07
	65		4.59	4.88	5.31	6.02	6.71	7.40	8.07	8.73	9.38	10.01	10.64	11.25	11.84	12.43	13.00	13.56
	68		4.81	5.11	5.57	6.31	7.05	7.77	8.48	9.17	9.86	10.53	11.19	11.84	12.47	13.10	13.71	14.30
	70		4.96	5.27	5.74	6.51	7.27	8.02	8.75	9.47	10.18	10.88	11.56	12.23	12.89	13.54	14.17	14.80
		73	5.18	5.51	6.00	6.81	7.60	8.38	9.16	9.91	10.66	11.39	12.11	12.82	13.52	14.21	14.88	15.54
76 (76.1)			5.40	5.75	6.26	7.10	7.93	8.75	9.56	10.36	11.14	11.91	12.67	13.42	14.15	14.87	15.58	16.28
	77		5.47	5.82	6.34	7.20	8.05	8.88	9.70	10.51	11.30	12.08	12.85	13.61	14.36	15.09	15.81	16.52
	80		5.70	6.06	6.60	7.50	8.38	9.25	10.11	10.95	11.78	12.60	13.41	14.21	14.99	15.76	16.52	17.26

外径（mm）			壁厚（mm）															
系列 1	系列 2	系列 3	11	12 (12.5)	13	14 (14.2)	15	16	17 (17.5)	18	19	20	22 (22.2)	24	25	26	28	30
			单位长度理论质量 [a]（kg/m）															
		30																
	32 (31.8)																	
34 (33.7)																		
		35																
	38																	
	40																	
42 (42.4)																		
		45 (44.5)	9.22	9.77														
48 (48.3)			10.04	10.65														
	51		10.85	11.54														
		54	11.66	12.43	13.14	13.81												
	57		12.48	13.32	14.11	14.85												
60 (60.3)			13.29	14.21	15.07	15.88	16.65	17.36										
	63 (63.5)		14.11	15.09	16.03	16.92	17.76	18.55										
	65		14.65	15.68	16.67	17.61	18.50	19.33										
	68		15.46	16.57	17.63	18.64	19.61	20.52										
	70		16.01	17.16	18.27	19.33	20.35	21.31	22.22									
		73	16.82	18.05	19.24	20.37	21.46	22.49	23.48	24.41	25.30							

续表

外径（mm）			壁厚（mm）															
系列 1	系列 2	系列 3	11	12（12.5）	13	14（14.2）	15	16	17（17.5）	18	19	20	22（22.2）	24	25	26	28	30
			单位长度理论质量 [a]（kg/m）															
76（76.1）			17.63	18.94	20.20	21.41	22.57	23.68	24.74	25.75	26.71	27.62						
	77		17.90	19.24	20.52	21.75	22.94	24.07	25.15	26.19	27.18	28.11						
	80		18.72	20.12	21.48	22.79	24.05	25.25	26.41	27.52	28.58	29.59						

外径（mm）			壁厚（mm）															
系列 1	系列 2	系列 3	0.25	0.30	0.40	0.50	0.60	0.80	1.0	1.2	1.4	1.5	1.6	1.8	2.0	2.2（2.3）	2.5（2.6）	2.8
			单位长度理论质量 [a]（kg/m）															
		83（82.5）									2.82	3.01	3.21	3.60	4.00	4.38	4.96	5.54
	85										2.89	3.09	3.29	3.69	4.09	4.49	5.09	5.68
89（88.9）											3.02	3.24	3.45	3.87	4.29	4.71	5.33	5.95
	95										3.23	3.46	3.69	4.14	4.59	5.03	5.70	6.37
	102（101.6）										3.47	3.72	3.96	4.45	4.98	5.41	6.13	6.85
		108									3.68	3.94	4.20	4.71	5.23	5.74	6.50	7.26
114（114.3）												4.16	4.44	4.98	5.52	6.07	6.87	7.68
	121											4.42	4.71	5.29	5.87	6.45	7.31	8.16
	127													5.56	6.17	6.77	7.68	8.58
	133																8.05	8.99
140（139.7）																		
		142（141.3）																
	146																	
		152（152.4）																
		159																
168（168.3）																		
		180（177.8）																
		194（193.7）																
	203																	
219（219.1）																		
		232																
		245（244.5）																
		267（267.4）																

续表

外径（mm）			壁厚（mm）															
系列 1	系列 2	系列 3	(2.9) 3.0	3.2	3.5 (3.6)	4.0	4.5	5.0	(5.4) 5.5	6.0	(6.3) 6.5	7.0 (7.1)	7.5	8.0	8.5	(8.8) 9.0	9.5	10
			单位长度理论质量[a]（kg/m）															
		83 (82.5)	5.92	6.30	6.86	7.79	8.71	9.62	10.51	11.39	12.26	13.12	13.96	14.80	15.62	16.42	17.22	18.00
	85		6.07	6.46	7.08	7.99	8.93	9.86	10.78	11.69	12.58	13.47	14.33	15.19	16.04	16.87	17.69	18.50
89 (88.9)			6.36	6.77	7.38	8.38	9.38	10.36	11.33	12.28	13.22	14.16	15.07	15.98	16.87	17.76	18.63	19.48
	95		6.81	7.24	7.90	8.98	10.04	11.10	12.14	13.17	14.19	15.19	16.18	17.16	18.13	19.09	20.03	20.96
	102 (101.6)		7.32	7.80	8.50	9.67	10.82	11.96	13.09	14.21	15.31	16.40	17.48	18.55	19.60	20.64	21.67	22.69
		108	7.77	8.27	9.02	10.26	11.49	12.70	13.90	15.09	16.27	17.44	18.59	19.73	20.86	21.97	23.08	24.17
114 (114.3)			8.21	8.74	9.54	10.85	12.15	13.44	14.72	15.98	17.23	18.47	19.70	20.91	22.12	23.31	24.48	25.65
	121		8.73	9.30	10.14	11.54	12.93	14.30	15.67	17.02	18.35	19.68	20.99	22.29	23.58	24.86	26.12	27.37
	127		9.17	9.77	10.66	12.18	13.59	15.04	16.48	17.90	19.32	20.72	22.10	23.48	24.84	26.19	27.53	28.85
	133		9.62	10.24	11.18	12.73	14.26	15.78	17.29	18.79	20.28	21.75	23.21	24.66	26.10	27.52	28.93	30.33
140 (139.7)			10.14	10.80	11.78	13.42	15.04	16.65	18.24	19.83	21.40	22.96	24.51	26.04	27.57	29.08	30.57	32.05
		142 (141.3)	10.28	10.95	11.95	13.61	15.26	16.89	18.51	20.12	21.72	23.31	24.88	26.44	27.98	29.52	31.04	32.55
	146		10.58	11.27	12.30	14.01	15.70	17.39	19.06	20.72	22.36	24.00	25.62	27.23	28.82	30.41	31.98	33.54
		152 (152.4)	11.02	11.74	12.82	14.60	16.37	18.13	19.87	21.60	23.32	25.03	26.73	28.41	30.08	31.74	33.39	35.02
		159			13.42	15.29	17.15	18.99	20.82	22.64	24.45	26.24	28.02	29.79	31.55	33.29	35.03	36.75
168 (168.3)					14.20	16.18	18.14	20.10	22.04	23.97	25.89	27.79	29.69	31.57	33.43	35.29	37.13	38.97
		180 (177.8)			15.23	17.36	19.48	21.58	23.67	25.75	27.81	29.87	31.91	33.93	35.95	37.95	39.95	41.92
		194 (193.7)			16.44	18.74	21.03	23.31	25.57	27.82	30.06	32.28	34.50	36.70	38.89	41.06	43.23	45.38
	203				17.22	19.63	22.03	24.41	26.79	29.15	31.50	33.84	36.16	38.47	40.77	43.06	45.33	47.60
219 (219.1)										31.52	34.06	36.60	39.12	41.63	44.13	46.61	49.08	51.54
		232								33.44	36.15	38.84	41.52	44.19	46.85	49.50	52.13	54.75
		245 (244.5)								35.36	38.23	41.09	43.93	46.76	49.58	52.38	55.17	57.95
		267 (267.4)								38.62	41.76	44.88	48.00	51.10	54.19	57.26	60.33	63.38

续表

外径（mm）			壁厚（mm）															
系列 1	系列 2	系列 3	11	12 (12.5)	13	14 (14.2)	15	16	17 (17.5)	18	19	20	22 (22.2)	24	25	26	28	30
			单位长度理论质量 [a]（kg/m）															
		83 (82.5)	19.53	21.01	22.44	23.82	25.15	26.44	27.67	28.85	29.99	31.07	33.10					
	85		20.07	21.60	23.08	24.51	25.89	27.23	28.51	29.74	30.93	32.06	34.18					
89 (88.9)			21.16	22.79	24.37	25.89	27.37	28.80	30.19	31.52	32.80	34.03	36.35	38.47				
	95		22.79	24.56	26.29	27.97	29.59	31.17	32.70	34.18	35.61	36.99	39.61	42.02				
	102 (101.6)		24.69	26.63	28.53	30.38	32.18	33.93	35.64	37.29	38.89	40.44	43.40	46.17	47.47	48.73	51.10	
		108	26.31	28.41	30.46	32.45	34.40	36.30	38.15	39.95	41.70	43.40	46.66	49.71	51.17	52.58	55.24	57.71
114 (114.3)			27.94	30.19	32.38	34.53	36.62	38.67	40.67	42.62	44.51	46.36	49.91	53.27	54.87	56.43	59.39	62.15
	121		29.84	32.26	34.62	36.94	39.21	41.43	43.60	45.72	47.79	49.82	53.71	57.41	59.19	60.91	64.22	67.33
	127		31.47	34.03	36.55	39.01	41.43	43.80	46.12	48.39	50.61	52.78	56.97	60.96	62.89	64.76	68.36	71.77
	133		33.10	35.81	38.47	41.09	43.65	46.17	48.63	51.05	53.42	55.74	60.22	64.51	66.59	68.61	72.50	76.20
140 (139.7)			34.99	37.88	40.72	43.50	46.24	48.93	51.57	54.16	56.70	59.19	64.02	68.66	70.90	73.10	77.34	81.38
		142 (141.3)	35.54	38.47	41.36	44.19	46.98	49.72	52.41	55.04	57.63	60.17	65.11	69.84	72.14	74.38	78.72	82.86
	146		36.62	39.66	42.64	45.57	48.46	51.30	54.08	56.82	59.51	62.15	67.28	72.21	74.60	76.94	81.48	85.82
		152 (152.4)	38.25	41.43	44.56	47.65	50.68	53.65	56.60	59.48	62.32	65.11	70.53	75.76	78.30	80.79	85.62	90.26
		159	40.15	43.50	40.81	50.06	53.27	56.43	59.53	62.59	65.60	68.56	74.33	79.90	82.62	85.28	90.46	95.44
168 (168.3)			42.59	46.17	49.69	53.17	56.60	59.98	63.31	66.59	69.82	73.00	79.21	85.23	88.17	91.05	96.67	102.10
		180 (177.8)	45.85	49.72	53.54	57.31	61.04	64.71	68.34	71.91	75.44	78.92	85.72	92.33	95.56	98.74	104.96	110.98
		194 (193.7)	49.64	53.86	58.03	62.15	66.22	70.24	74.21	78.13	82.00	85.82	93.32	100.62	104.20	107.72	114.63	121.33
	203		52.09	56.52	60.91	65.25	69.55	73.79	77.98	82.13	86.22	90.26	98.20	105.95	109.74	113.49	120.84	127.99
219 (219.1)			56.43	61.26	66.04	70.78	75.46	80.10	84.69	89.23	93.71	98.15	106.88	115.42	119.61	123.75	131.89	139.83
		232	59.95	65.11	70.21	75.27	80.27	85.23	90.14	95.00	99.81	104.57	113.94	123.11	127.62	132.09	140.87	149.45
		245 (244.5)	63.48	68.95	74.38	79.76	85.08	90.36	95.59	100.77	105.90	110.98	120.99	130.80	135.64	140.42	149.84	159.07
		267 (267.4)	69.45	75.46	81.43	87.35	93.22	99.04	104.81	110.53	116.21	121.83	132.93	143.83	149.20	154.53	165.04	175.34

续表

外径（mm）			壁厚（mm）											
系列 1	系列 2	系列 3	32	34	36	38	40	42	45	48	50	55	60	65
			单位长度理论质量[a]（kg/m）											
		83（82.5）												
	85													
89（88.9）														
	95													
	102（101.6）													
		108												
114（114.3）														
	121		70.24											
	127		74.97											
	133		79.71	83.01	86.12									
140（139.7）			85.23	88.88	92.33									
		142（141.3）	86.81	90.56	94.11									
	146		89.97	93.91	97.66	101.21	104.57							
		152（152.4）	94.70	98.94	102.99	106.83	110.48							
		159	100.22	104.81	109.20	113.39	117.39	121.19	126.51					
168（168.3）			107.33	112.36	117.19	121.83	126.27	130.51	136.50					
		180（177.8）	116.80	122.42	127.85	133.07	138.10	142.94	149.82	156.26	160.30			
		194（193.7）	127.85	134.16	140.27	146.19	151.92	157.44	165.36	172.83	177.56			
	203		134.95	141.71	148.27	154.63	160.79	166.76	175.34	183.48	188.66	200.75		
219（219.1）			147.57	155.12	162.47	169.62	176.58	183.33	193.10	202.42	208.39	222.45		
		232	157.83	186.02	174.01	181.81	189.40	196.80	207.53	217.81	224.42	240.08	254.51	267.70
		245（244.5）	168.09	176.92	185.55	198.99	202.22	210.26	221.95	233.20	240.45	257.71	273.74	288.54
		267（267.4）	185.45	195.37	205.09	214.60	228.93	233.05	246.37	259.24	267.58	287.55	306.30	323.81

续表

外径（mm）			壁厚（mm）														
系列 1	系列 2	系列 3	3.5 (3.6)	4.0	4.5	5.0	(5.4) 5.5	6.0	(6.3) 6.5	7.0 (7.1)	7.5	8.0	8.5	(8.8) 9.0	9.5	10	11
			单位长度理论质量 [a]（kg/m）														
273									42.72	45.92	49.11	52.28	55.45	58.60	61.73	64.86	71.07
	299 (298.5)										53.92	57.41	60.90	64.37	67.83	71.37	78.13
		302									54.47	58.00	61.52	65.03	68.53	72.01	78.94
		318.5									57.52	61.26	64.98	68.69	72.39	76.08	83.42
325 (323.9)											58.73	52.54	66.35	70.14	73.92	77.68	85.18
	340 (339.7)											65.50	69.49	73.47	77.43	81.38	89.25
	351											67.67	71.80	75.91	80.01	84.10	92.23
356 (355.6)														77.02	81.18	85.33	93.59
		368												79.68	83.99	88.29	96.85
	377													81.68	86.10	90.51	99.29
	402													87.23	91.96	96.67	106.07
406 (406.4)														88.12	92.89	97.66	107.15
		419												91.00	95.94	100.87	110.68
	426													92.55	97.58	102.59	112.58
	450													97.88	103.20	108.51	119.09
457														99.44	104.84	110.24	120.99
	473													102.99	108.59	114.18	125.33
	480													104.54	110.23	115.91	127.23
	500													108.98	114.92	120.84	132.65
508														110.76	116.79	122.81	134.82
	530													115.64	121.95	128.24	140.79
		560 (559)												122.30	128.97	135.64	148.93
610														133.39	140.69	147.97	162.50

续表

外径（mm）			壁厚（mm）														
系列 1	系列 2	系列 3	12（12.5）	13	14（14.2）	15	16	17（17.5）	18	19	20	22（22.2）	24	25	26	28	30
			单位长度理论质量[a]（kg/m）														
273			77.24	83.36	89.42	95.44	101.41	107.33	113.20	119.02	124.79	136.18	147.38	152.90	158.38	169.18	179.78
	299（298.5）		84.93	91.69	98.40	105.06	111.67	118.23	124.74	131.20	137.61	150.29	162.77	168.93	175.05	187.13	199.02
		302	85.82	92.65	99.44	106.17	112.85	119.49	126.07	132.61	139.09	151.92	164.54	170.78	176.97	189.20	201.24
		318.5	90.71	97.94	105.13	112.27	119.36	126.40	133.39	140.34	147.23	160.87	174.31	180.95	187.55	200.60	213.45
325（323.9）			92.63	100.03	107.38	114.68	121.93	129.13	136.28	143.38	150.44	164.39	178.16	184.96	191.72	205.09	218.25
	340（339.7）		97.07	104.84	112.56	120.23	127.85	135.42	142.94	150.41	157.83	172.53	187.03	194.21	201.34	215.44	229.35
	351		100.32	108.36	116.35	124.29	132.19	140.03	147.82	155.57	163.26	178.50	193.54	200.99	208.39	223.04	237.49
356（355.6）			101.80	109.97	118.08	126.14	134.16	142.12	150.04	157.91	165.73	181.21	196.50	204.07	211.60	226.49	241.19
		368	105.35	113.81	122.22	130.58	138.89	147.16	155.37	163.53	171.64	187.72	203.61	211.47	219.29	234.78	250.07
	377		108.02	116.70	125.33	133.91	142.45	150.93	159.36	167.75	176.08	192.61	208.93	217.02	225.06	240.99	256.73
	402		115.42	124.71	133.96	143.16	152.31	161.41	170.46	179.46	188.41	206.17	223.73	232.44	241.09	258.26	275.22
406（406.4）			116.60	126.00	135.34	144.64	153.89	163.09	172.24	181.34	190.39	208.34	226.10	234.90	243.66	261.02	278.18
		419	120.45	130.16	139.83	149.45	159.02	168.54	178.01	187.43	196.80	215.39	233.79	242.92	251.99	269.99	287.80
	426		122.52	132.41	142.25	152.04	161.78	171.47	181.11	190.71	200.25	219.19	237.93	247.23	256.48	274.83	292.98
	450		129.62	140.10	150.53	160.92	171.26	181.53	191.77	201.95	212.09	232.21	252.14	262.03	271.87	291.40	310.74
457			131.69	142.35	152.95	163.51	174.01	184.47	194.88	205.23	215.54	236.01	256.28	266.34	276.36	296.23	315.91
	473		136.43	147.48	158.48	169.42	180.33	191.18	201.98	212.73	223.43	244.69	265.75	276.21	286.62	307.28	327.75
	480		138.50	149.72	160.89	172.01	183.09	194.11	205.09	216.01	226.89	248.49	269.90	280.53	291.11	312.12	332.93
	500		144.42	156.13	167.80	179.41	190.98	202.50	213.96	225.38	236.75	259.34	281.73	292.86	303.93	325.93	347.93
508			146.79	158.70	170.56	182.37	194.14	205.85	217.51	229.13	240.70	263.68	286.47	297.79	309.06	331.45	353.65
	530		153.30	165.75	178.16	190.51	202.82	215.07	227.28	239.44	251.55	275.62	299.49	311.35	323.17	346.64	369.92
		560（559）	162.17	175.37	188.51	201.61	214.65	227.65	240.60	253.50	266.34	291.89	317.25	329.85	342.40	367.36	392.12
610			176.97	191.40	205.78	220.10	234.38	248.61	262.79	276.92	291.01	319.02	346.84	360.68	374.46	401.88	429.11

续表

外径（mm）			壁厚（mm）														
系列1	系列2	系列3	32	34	36	38	40	42	45	48	50	55	60	65	70	75	80
			单位长度理论质量[a]（kg/m）														
273			190.19	200.40	210.41	220.23	229.85	239.27	253.03	266.34	274.98	295.69	315.17	333.42	350.44	366.22	380.77
	299（298.5）		210.71	222.20	233.50	244.59	255.49	266.20	281.88	297.12	307.04	330.96	353.65	375.10	395.32	414.31	432.07
		302	231.08	224.72	236.16	247.40	258.45	269.30	285.21	300.67	310.74	335.03	358.09	379.91	400.50	419.86	437.99
		318.5	226.10	238.55	250.81	262.87	274.73	286.39	303.52	320.21	331.08	357.41	382.50	406.36	428.99	450.38	470.54
325（323.9）			231.23	244.00	256.58	268.96	281.14	293.13	310.74	327.90	339.10	366.22	392.12	416.78	440.21	462.40	483.37
	340（339.7）		243.06	256.58	269.90	283.02	295.94	308.66	327.38	345.66	357.59	386.57	414.31	440.83	466.10	490.15	512.96
	351		251.75	265.80	279.66	293.32	306.79	320.06	339.59	358.68	371.16	401.49	430.59	458.46	485.09	510.49	534.66
356（355.6）			255.69	269.99	284.10	298.01	311.72	325.24	345.14	364.60	377.32	408.27	437.99	466.47	493.72	519.74	544.53
		368	265.16	280.06	294.75	309.26	323.56	337.67	358.46	378.80	392.12	424.55	455.75	485.71	514.44	541.94	568.20
	377		272.26	287.60	302.75	317.69	332.44	346.99	368.44	389.46	403.22	436.76	469.06	500.14	529.98	558.58	585.96
	402		291.99	308.57	324.94	341.12	357.10	372.88	396.19	419.05	434.04	470.67	506.06	540.21	573.13	604.82	635.28
406（406.4）			295.15	311.92	328.49	344.87	361.05	377.03	400.63	423.78	438.98	476.09	511.97	546.62	580.04	612.22	643.17
		419	305.41	322.82	340.03	357.05	373.87	390.49	415.05	439.17	455.01	493.72	531.21	567.46	602.48	636.27	668.82
	426		310.93	328.69	346.25	363.61	380.77	397.74	422.82	447.46	463.64	503.22	541.57	578.68	614.57	649.22	682.63
	450		329.87	348.81	367.56	386.10	404.45	422.60	449.46	475.87	493.23	535.77	577.08	617.16	656.00	693.61	729.98
457			335.40	354.68	373.77	392.66	411.35	429.85	457.23	484.16	501.86	545.27	587.44	628.38	668.08	706.55	743.79
	473		348.02	368.10	387.98	407.66	427.14	446.42	474.98	503.10	521.59	566.97	611.11	654.02	695.70	736.15	775.83
	480		353.55	373.97	394.19	414.22	434.04	453.67	482.75	511.38	530.22	576.46	621.47	665.25	707.79	749.09	789.17
	500		369.33	390.74	411.95	432.96	453.77	474.39	504.95	535.06	554.89	603.59	651.07	697.31	742.31	786.09	828.63
508			375.64	397.45	419.05	440.46	461.66	482.68	513.82	544.53	564.75	614.44	662.90	710.13	756.12	800.88	844.41
	530		393.01	415.89	438.58	461.07	483.37	505.46	538.24	570.57	591.88	644.28	695.46	745.40	794.10	841.58	887.82
		560（559）	416.68	441.06	465.22	489.19	512.96	536.54	571.53	606.08	628.87	684.97	739.85	793.49	845.89	897.06	947.00
610			456.14	482.97	509.61	536.04	562.28	588.33	627.02	665.27	690.52	752.79	813.83	873.64	932.21	989.55	1045.65

续表

外径（mm）			壁厚（mm）														
系列 1	系列 2	系列 3	85	90	95	100	110	120									
			单位长度理论质量[a]（kg/m）														
273			394.09														
	299（298.5）		448.59	463.88	477.94	490.77											
		302	454.88	470.54	484.97	498.16											
		318.5	489.47	507.16	523.63	538.86											
325（323.9）			503.10	521.59	588.86	554.89											
	340（339.7）		534.54	554.89	574.00	591.88											
	351		557.60	579.30	599.77	619.01											
356（355.6）			568.08	590.40	611.48	631.34											
		368	593.23	617.03	639.60	660.93											
	377		612.10	637.01	660.68	683.13											
	402		664.51	692.50	719.25	744.78											
406（406.4）			672.89	701.37	728.63	754.64											
		419	700.14	730.23	759.08	786.70											
	426		714.82	745.77	775.48	803.97											
	450		765.12	799.03	831.71	863.15											
457			779.80	814.57	848.11	880.42											
	473		813.34	850.08	885.60	919.88											
	480		828.01	865.62	902.00	937.14											
	500		869.94	910.01	948.85	986.46	1057.98										
508			886.71	927.77	967.60	1006.19	1079.68										
	530		932.82	976.60	1019.14	1060.45	1139.36	1213.35									
		560（559）	995.71	1043.18	1089.42	1134.43	1220.75	1302.13									
610			1100.52	1154.16	1206.57	1257.74	1356.39	1450.10									

外径（mm）			壁厚（mm）													
系列 1	系列 2	系列 3	9	9.5	10	11	12（12.5）	13	14（14.2）	15	16	17（17.5）	18	19	20	22（22.2）
			单位长度理论质量（kg/m）													
	630		137.83	145.37	152.90	167.92	182.89	197.81	212.68	227.50	242.28	257.00	271.67	286.30	300.87	329.87
		660	144.49	152.40	160.30	176.06	191.77	207.43	223.04	238.60	254.11	269.58	284.99	300.35	315.67	346.15
		699					203.31	219.93	236.50	253.03	269.50	285.93	302.30	318.63	334.90	367.31
711							206.86	223.78	240.65	257.47	274.24	290.96	307.63	324.25	340.82	373.82
	720						209.52	226.66	243.75	260.80	277.79	294.73	311.62	328.47	345.26	378.70
	762														365.98	401.49
		788.5													379.05	415.87

续表

外径（mm）			壁厚（mm）													
系列 1	系列 2	系列 3	9	9.5	10	11	12（12.5）	13	14（14.2）	15	16	17（17.5）	18	19	20	22（22.2）
			单位长度理论质量 [a]（kg/m）													
813															391.13	429.16
		864													416.29	456.83
914																
		965														
1016																

外径（mm）			壁厚（mm）												
系列 1	系列 2	系列 3	24	25	26	28	30	32	34	36	38	40	42	45	48
			单位长度理论质量 [a]（kg/m）												
	630		358.68	373.01	387.29	415.70	443.91	471.92	499.74	527.36	554.79	582.01	609.04	649.22	688.95
		660	376.43	391.50	406.52	436.41	466.10	495.60	524.90	554.00	582.90	611.61	640.12	682.51	724.46
		699	399.52	415.55	431.53	463.34	494.96	526.38	557.60	588.62	619.45	650.08	680.51	725.79	770.62
711			406.62	422.95	439.22	471.63	503.84	535.85	567.66	599.28	630.69	661.92	692.94	739.11	784.83
	720		411.95	428.49	444.99	477.84	510.49	542.95	575.21	607.27	639.13	670.79	702.26	749.09	795.48
	762		436.81	454.39	471.92	506.84	541.57	576.09	610.42	644.55	678.49	712.23	745.77	795.71	845.20
		788.5	452.49	470.73	488.92	525.14	561.17	597.01	632.64	658.08	703.32	738.37	773.21	825.11	876.57
813			466.99	485.83	504.62	542.06	579.30	616.34	653.18	689.83	726.28	762.54	798.59	852.30	905.57
		864	497.18	517.28	537.33	577.28	617.03	656.59	695.95	735.11	774.08	812.85	851.42	908.90	965.94
914				548.10	569.39	611.80	654.02	696.05	737.87	779.50	820.93	862.17	903.20	964.39	1025.13
		965		979.555	602.09	647.02	691.76	736.30	780.64	824.78	868.73	912.48	956.03	1020.99	1085.50
1016				610.99	634.79	682.24	729.49	776.54	823.40	870.06	916.52	962.79	1008.85	1077.59	1145.87

外径（mm）			壁厚（mm）												
系列 1	系列 2	系列 3	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	110	120
			单位长度理论质量（kg/m）												
	630		715.19	779.92	843.43	905.70	966.73	1026.54	1085.11	1142.45	1198.55	1253.42	1307.06	1410.64	1509.29
		660	752.18	820.61	887.82	953.79	1018.52	1082.03	1144.30	1205.33	1265.14	1323.71	1381.05	1492.02	1598.07
		699	800.27	873.51	945.52	1016.30	1085.85	1154.16	1221.24	1287.09	1351.70	1415.08	1477.23	1597.82	1713.49
711			815.06	889.79	963.28	1035.54	1106.56	1176.36	1244.92	1312.24	1378.33	1443.19	1506.82	1630.38	1749.00
	720		826.16	902.00	976.60	1049.97	1122.10	1193.00	1262.67	1331.11	1398.31	1464.28	1529.02	1654.79	1775.63
	762		877.95	958.96	1038.74	1117.29	1194.61	1270.69	1345.53	1419.15	1491.53	1562.68	1632.60	1768.73	1899.93
		788.5	910.63	994.91	1077.96	1159.77	1240.35	1319.70	1397.82	1474.70	1550.35	1624.77	1697.95	1840.62	1978.35
813			940.84	1028.14	1114.21	1199.05	1282.65	1365.02	1446.15	1526.06	1604.73	1682.17	1758.37	1907.08	2050.86
		864	1003.73	1097.32	1189.67	1280.80	1370.69	1459.35	1546.77	1632.97	1717.92	1801.65	1884.14	2045.43	2201.78
914			1065.38	1165.14	1263.66	1360.95	1457.00	1551.83	1645.42	1737.78	1828.90	1918.79	2007.45	2181.07	2349.75
		965	1128.27	1234.31	1339.12	1442.70	1545.05	1646.16	1746.04	1844.68	1942.10	2038.28	2133.22	2319.42	2500.68
1016			1191.15	1303.49	1414.59	1524.45	1633.09	1740.49	1846.66	1951.59	2055.29	2157.76	2259.00	2457.77	2651.61

注　括号内尺寸为相应的 ISO 4200 的规格。

[a] 理论质量按式（F-3）计算，钢的密度为 $7.85kg/dm^3$。

表 F-19 精密钢管的外径和壁厚及单位长度理论质量

外径（mm）		壁厚（mm）																				
系列 2	系列 3	0.5	（0.8）	1.0	（1.2）	1.5	（1.8）	2.0	（2.2）	2.5	（2.8）	3.0	（3.5）	4	（4.5）	5	（5.5）	6	（7）	8	（9）	10
		单位长度理论质量[a]（kg/m）																				
4		0.043	0.063	0.074	0.083																	
5		0.055	0.083	0.099	0.112																	
6		0.068	0.103	0.123	0.142	0.166	0.186	0.197														
8		0.092	0.142	0.173	0.201	0.240	0.275	0.296	0.315	0.339												
10		0.117	0.182	0.222	0.260	0.314	0.364	0.395	0.423	0.462												
12		0.142	0.221	0.271	0.320	0.388	0.453	0.493	0.532	0.586	0.635	0.666										
12.7		0.150	0.235	0.289	0.340	0.414	0.484	0.528	0.570	0.629	0.684	0.718										
	14	0.166	0.260	0.321	0.379	0.462	0.542	0.592	0.640	0.709	0.773	0.814	0.906									
16		0.191	0.300	0.370	0.438	0.536	0.630	0.691	0.749	0.832	0.911	0.962	1.08	1.18								
	18	0.216	0.339	0.419	0.497	0.610	0.719	0.789	0.857	0.956	1.05	1.11	1.25	1.38	1.50							
20		0.240	0.379	0.469	0.556	0.684	0.808	0.888	0.966	1.08	1.19	1.26	1.42	1.58	1.72	1.85						
	22	0.265	0.418	0.518	0.616	0.758	0.897	0.986	1.07	1.20	1.33	1.41	1.60	1.78	1.94	2.10						
25		0.302	0.477	0.592	0.704	0.869	1.03	1.13	1.24	1.39	1.53	1.63	1.86	2.07	2.28	2.47	2.64	2.81				
	28	0.339	0.537	0.666	0.793	0.980	1.16	1.28	1.40	1.57	1.74	1.85	2.11	2.37	2.61	2.84	3.05	3.26	3.68	3.95		
	30	0.364	0.576	0.715	0.852	1.05	1.25	1.38	1.51	1.70	1.88	2.00	2.29	2.56	2.83	3.08	3.32	3.55	3.97	4.34		
32		0.388	0.616	0.765	0.911	1.18	1.34	1.48	1.62	1.82	2.02	2.15	2.46	2.76	3.05	3.33	3.59	3.85	4.32	4.74		
	35	0.425	0.675	0.838	1.00	1.24	1.47	1.63	1.78	2.00	2.22	2.37	2.72	3.06	3.38	3.70	4.00	4.29	4.83	5.33		
38		0.462	0.734	0.912	1.09	1.35	1.61	1.78	1.94	2.19	2.43	2.59	2.98	3.35	3.72	4.07	4.41	4.74	5.35	5.92	6.44	6.91
40		0.487	0.773	0.962	1.15	1.42	1.70	1.87	2.05	2.31	2.57	2.74	3.15	3.55	3.94	4.32	4.68	5.03	5.70	6.31	6.88	7.40
42			0.813	1.01	1.21	1.50	1.78	1.97	2.16	2.44	2.71	2.89	3.32	3.75	4.16	4.56	4.95	5.33	6.04	6.71	7.32	7.89

续表

外径（mm）		壁厚（mm）																	
系列 2	系列 3	(0.8)	1.0	(1.2)	1.5	(1.8)	2.0	(2.2)	2.5	(2.8)	3.0	(3.5)	4	(4.5)	5	(5.5)	6	(7)	8
		单位长度理论质量[a]（kg/m）																	
	45	0.872	1.09	1.30	1.61	1.92	2.12	2.32	2.62	2.91	3.11	3.58	4.04	4.49	4.93	5.36	5.77	6.56	7.30
48		0.931	1.16	1.38	1.72	2.05	2.27	2.48	2.81	3.12	3.33	3.84	4.34	4.83	5.30	5.76	6.21	7.08	7.89
50		0.971	1.21	1.44	1.79	2.14	2.37	2.59	2.93	3.26	3.48	4.01	4.54	5.05	5.55	6.04	6.51	7.42	8.29
	55	1.07	1.33	1.59	1.98	2.36	2.61	2.86	3.24	3.60	3.85	4.45	5.03	5.60	6.17	6.71	7.25	8.29	9.27
60		1.17	1.46	1.74	2.16	2.58	2.86	3.14	3.55	3.95	4.22	4.88	5.52	6.15	6.78	7.39	7.99	9.15	10.26
63		1.23	1.53	1.83	2.28	2.72	3.01	3.30	3.73	4.16	4.44	5.14	5.82	6.49	7.15	7.80	8.43	0.67	10.85
70		1.37	1.70	2.04	2.53	3.03	3.35	3.68	4.16	4.64	4.96	5.74	6.51	7.27	8.02	8.75	9.47	10.88	12.23
76		1.48	1.85	2.21	2.76	3.29	3.65	4.00	4.53	5.05	5.40	6.26	7.10	7.93	8.75	9.56	10.36	11.91	13.42
80		1.56	1.95	2.33	2.90	3.47	3.85	4.22	4.78	5.33	5.70	6.60	7.50	8.38	9.25	10.11	10.95	12.60	14.21
	90			2.63	3.27	3.92	4.34	4.76	5.39	6.02	6.44	7.47	8.48	9.49	10.48	11.46	12.43	14.33	16.18
100				2.92	3.64	4.36	4.83	5.31	6.01	6.71	7.18	8.33	9.47	10.60	11.71	12.82	13.91	16.05	18.15
	110			3.22	4.01	4.80	5.33	5.85	6.63	7.40	7.92	9.19	10.46	11.71	12.95	14.17	15.39	17.78	20.12
120						5.25	5.82	6.39	7.24	8.09	8.66	10.06	11.44	12.82	14.18	15.53	16.87	19.51	22.10
130						5.69	6.31	6.93	7.86	8.78	9.40	10.92	12.43	13.93	15.41	15.89	18.35	21.23	24.07
	140					6.13	6.81	7.48	8.48	9.47	10.14	11.78	13.42	15.04	16.65	18.24	19.83	22.96	26.04
150						6.58	7.30	8.02	9.09	10.16	10.88	12.65	14.40	16.15	17.88	19.60	21.31	24.69	28.02
160						7.02	7.79	8.56	9.71	10.86	11.62	13.51	15.39	17.26	19.11	20.96	22.79	26.41	29.99
170												14.37	16.38	18.37	20.35	22.31	24.27	28.14	31.96
	180														21.58	23.67	25.75	29.87	33.93
190																25.03	27.23	31.59	35.91
200																	28.71	33.32	37.88
	220																	36.77	41.83

续表

外径（mm）		壁厚（mm）									
系列 2	系列 3	（9）	10	（11）	12.5	（14）	16	（18）	20	（22）	25
		单位长度理论质量[a]（kg/m）									
	45	7.99	8.63	9.22	10.02						
48		8.66	9.37	10.04	10.94						
50		9.10	9.86	10.58	11.56						
	55	10.21	11.10	11.94	13.10	14.16					
60		11.32	12.33	13.29	14.64	15.88	17.36				
63		11.99	13.07	14.11	15.57	16.92	18.55				
70		13.54	14.80	16.01	17.73	19.33	21.31				
76		14.87	16.28	17.63	19.58	21.41	23.68				
80		15.76	17.26	18.72	20.81	22.79	25.25	27.52			
	90	17.98	19.73	21.43	23.89	26.24	29.20	31.96	34.53	36.89	
100		20.20	22.20	24.14	26.97	29.69	33.15	36.40	39.46	42.32	46.24
	110	22.42	24.66	26.86	30.06	33.15	37.09	40.84	44.39	47.74	52.41
120		24.64	27.13	29.57	33.14	36.60	41.04	45.28	49.32	53.17	58.57
130		26.86	29.59	32.28	36.22	40.05	44.98	49.72	54.26	58.60	64.74
	140	29.08	32.06	34.99	39.30	43.50	48.93	54.16	59.19	64.02	70.90
150		31.30	34.53	37.71	42.39	46.96	52.87	58.60	64.12	69.45	77.07
160		33.52	36.99	40.42	45.47	50.41	56.82	63.03	69.05	74.87	83.23
170		35.73	39.46	43.13	48.55	53.86	60.77	67.47	73.98	80.30	89.40
	180	37.95	41.92	45.85	51.64	57.31	64.71	71.91	78.92	85.72	95.56
190		40.17	44.39	48.56	54.72	60.77	68.66	76.35	83.85	91.15	101.73
200		42.39	46.86	51.27	57.80	64.22	72.60	80.79	88.78	96.57	107.89
	220	46.83	51.79	56.70	63.97	71.12	80.50	89.67	98.65	107.43	120.23

外径（mm）		壁厚（mm）													
系列 2	系列 3	（5.5）	6	（7）	8	9	10	（11）	12.5	（14）	16	（18）	20	（22）	25
		单位长度理论质量[a]（kg/m）													
	240			40.22	45.77	51.27	56.72	62.12	70.13	78.03	88.39	98.55	108.51	118.28	132.56
	260			43.68	49.72	55.71	61.65	67.55	76.30	84.93	96.28	107.43	118.38	129.13	144.89

注　括号内尺寸不推荐使用。

[a] 理论质量按式（F-3）计算，钢的密度为 $7.85kg/dm^3$。

表 F-20　　不锈钢管的外径和壁厚

外径（mm）			壁厚（mm）													
系列 1	系列 2	系列 3	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4	1.5	1.6	2.0	2.2（2.3）	2.5（2.6）	2.8（2.9）
	6		•	•	•	•	•	•	•							
	7		•	•	•	•	•	•	•							
	8		•	•	•	•	•	•	•							
	9		•	•	•	•	•	•	•							
10（10.2）			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			
	12		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			
	12.7		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
13（13.5）			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		14	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	16		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
17（17.2）			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		18	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	19		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	20		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
21（21.3）			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		22	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	24		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	25		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		25.4						•	•	•	•	•	•	•	•	•
27（26.9）								•	•	•	•	•	•	•	•	•
		30						•	•	•	•	•	•	•	•	•
	32（31.8）							•	•	•	•	•	•	•	•	•

续表

外径（mm）			壁厚（mm）											
系列 1	系列 2	系列 3	3.0	3.2	3.5（3.6）	4.0	4.5	5.0	5.5（5.6）	6.0	（6.3）6.5	7.0（7.1）	7.5	8.0
	6													
	7													
	8													
	9													
10（10.2）														
	12													
	12.7		•	•										
13（13.5）			•	•										
		14	•	•	•									
	16		•	•	•	•								
17（17.2）			•	•	•	•								
		18	•	•	•	•	•							
	19		•	•	•	•	•							
	20		•	•	•	•	•							
21（21.3）			•	•	•	•	•	•						
		22	•	•	•	•	•	•						
	24		•	•	•	•	•	•						
	25		•	•	•	•	•	•	•	•				
		25.4	•	•	•	•	•	•	•	•				
27（26.9）			•	•	•	•	•	•	•	•				
		30	•	•	•	•	•	•	•	•	•			
	32（31.8）		•	•	•	•	•	•	•	•	•			

续表

外径（mm）			壁厚（mm）														
系列1	系列2	系列3	1.0	1.2	1.4	1.5	1.6	2.0	2.2（2.3）	2.5（2.6）	2.8（2.9）	3.0	3.2	3.5（3.6）	4.0	4.5	5.0
34（33.7）			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		35	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	38		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	40		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
42（42.4）			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		45（44.5）	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
48（48.3）			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	51		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		54					•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	57						•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
60（60.3）							•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	64（63.5）						•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	68						•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	70						•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	73						•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
76（76.1）							•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		83（82.5）					•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
89（88.9）							•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	95						•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	102（101.6）						•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	108						•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
114（114.3）							•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•

续表

外径（mm）			壁厚（mm）												
系列1	系列2	系列3	5.5（5.6）	6.0	（6.3）6.5	7.0（7.1）	7.5	8.0	8.5	（8.8）9.0	9.5	10	11	12（12.5）	14（14.2）
34（33.7）			•	•	•										
		35	•	•	•										
	38		•	•	•										
	40		•	•	•										
42（42.4）			•	•	•	•	•								
		45（44.5）	•	•	•	•	•	•	•						
48（48.3）			•	•	•	•	•	•	•						
	51		•	•	•	•	•	•	•	•					
		54	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			
	57		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			
60（60.3）			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			
	64（63.5）		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			
	68		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
	70		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
	73		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
76（76.1）			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
		83（82.5）	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
89（88.9）			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	95		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	102（101.6）		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	108		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
114（114.3）			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•

续表

外径（mm）			壁厚（mm）												
系列 1	系列 2	系列 3	1.6	2.0	2.2（2.3）	2.5（2.6）	2.8（2.9）	3.0	3.2	3.5（3.6）	4.0	4.5	5.0	5.5（5.6）	6.0
	127		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	133		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
140（139.7）			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	146		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	152		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	159		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
168（168.3）			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	180			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	194			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
219（219.1）				•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
	245			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
273				•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
325（323.9）						•	•	•	•	•	•	•	•	•	
	351					•	•	•	•	•	•	•	•	•	
356（355.6）						•	•	•	•	•	•	•	•	•	
	377					•	•	•	•	•	•	•	•	•	
406（406.4）						•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	426								•	•	•	•	•	•	•

续表

外径（mm）			壁厚（mm）									
系列 1	系列 2	系列 3	（6.3）6.5	7.0（7.1）	7.5	8.0	8.5	（8.8）9.0	9.5	10	11	12（12.5）
	127		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	133		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
140（139.7）			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	146		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	152		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	159		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
168（168.3）			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	180		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	194		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
219（219.1）			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	245		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
273			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
325（323.9）			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	351		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
356（355.6）			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	377		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
406（406.4）			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	426		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•

续表

外径（mm）			壁厚（mm）										
系列 1	系列 2	系列 3	14（14.2）	15	16	17（17.5）	18	20	22（22.2）	24	25	26	28
	127		•										
	133		•										
140（139.7）			•	•	•								
	146		•	•	•								
	152		•	•	•								
	159		•	•	•								
168（168.3）			•	•	•	•	•						
	180		•	•	•	•	•						
	194		•	•	•	•	•						
219（219.1）			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	245		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
273			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
325（323.9）			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	351		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
356（355.6）			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	377		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
406（406.4）			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	426		•	•	•	•	•	•					

注　括号内尺寸为相应的英制单位。

“•”表示常用规格。

（2）长度。钢管的通常长度 3000～12000mm。在通常长度范围内，可按定尺长度、倍尺长度或范围长度交货。

F.3.3.2　牌号和化学成分

优质碳素结构钢的牌号和化学成分（熔炼分析）应符合 GB/T 699 的规定。

低合金高强度结构钢的牌号和化学成分（熔炼分析）应符合 GB/T 8162 的规定。

合金高强度结构钢的牌号和化学成分（熔炼分析）应符合 GB/T 3077 的规定。

F.3.3.3　交货状态

热轧（扩）钢管以热轧状态或热处理状态交货；冷拔（轧）钢管应以退火或高温回火状态交货。

F.3.3.4　力学性能

优质碳素结构钢、低合金高强度结构钢的钢管，其交货状态的拉伸性能应符合表 F-21 的规定。

合金结构钢管试样毛坯按表 F-22 推荐热处理制度进行热处理后制成试样测出的纵向拉伸性能应符合表 F-22 的规定。

冷拔（轧）状态交货钢管的力学性能由供需双方协商。

表 F-21　　优质碳素结构钢、低合金高强度结构钢钢管的力学性能

<table>
<tr><th rowspan="3">牌号</th><th rowspan="3">质量等级</th><th rowspan="3">抗拉强度
R_m（MPa）</th><th colspan="3">下屈服强度 R_{eL}^{a}（MPa）
公称壁厚 S</th><th rowspan="2">断后伸长率 [b]
A（%）</th><th colspan="2">冲击试验</th></tr>
<tr><th>S≤16mm</th><th>16mm<S≤30mm</th><th>S>30mm</th><th rowspan="2">温度（℃）</th><th>吸收能量（KV_1/J）</th></tr>
<tr><th colspan="4">不小于</th><th>不小于</th></tr>
<tr><td>10</td><td>—</td><td>≥335</td><td>205</td><td>195</td><td>185</td><td>24</td><td>—</td><td>—</td></tr>
<tr><td>15</td><td>—</td><td>≥375</td><td>225</td><td>215</td><td>205</td><td>22</td><td>—</td><td>—</td></tr>
<tr><td>20</td><td>—</td><td>≥410</td><td>245</td><td>235</td><td>225</td><td>20</td><td>—</td><td>—</td></tr>
<tr><td>25</td><td>—</td><td>≥450</td><td>275</td><td>265</td><td>255</td><td>18</td><td>—</td><td>—</td></tr>
<tr><td>35</td><td>—</td><td>≥510</td><td>305</td><td>295</td><td>285</td><td>17</td><td>—</td><td>—</td></tr>
<tr><td>45</td><td>—</td><td>≥590</td><td>335</td><td>325</td><td>315</td><td>14</td><td>—</td><td>—</td></tr>
<tr><td>20Mn</td><td>—</td><td>≥450</td><td>275</td><td>265</td><td>255</td><td>20</td><td>—</td><td>—</td></tr>
<tr><td>25Mn</td><td>—</td><td>≥490</td><td>295</td><td>285</td><td>275</td><td>18</td><td>—</td><td>—</td></tr>
<tr><td rowspan="5">Q345</td><td>A</td><td rowspan="5">470～630</td><td rowspan="5">345</td><td rowspan="5">325</td><td rowspan="5">295</td><td rowspan="2">20</td><td>—</td><td>—</td></tr>
<tr><td>B</td><td>+20</td><td rowspan="3">34</td></tr>
<tr><td>C</td><td rowspan="3">21</td><td>0</td></tr>
<tr><td>D</td><td>−20</td></tr>
<tr><td>E</td><td>−40</td><td>27</td></tr>
<tr><td rowspan="5">Q390</td><td>A</td><td rowspan="5">490～650</td><td rowspan="5">390</td><td rowspan="5">370</td><td rowspan="5">350</td><td rowspan="2">18</td><td>—</td><td>—</td></tr>
<tr><td>B</td><td>+20</td><td rowspan="3">34</td></tr>
<tr><td>C</td><td rowspan="3">19</td><td>0</td></tr>
<tr><td>D</td><td>−20</td></tr>
<tr><td>E</td><td>−40</td><td>27</td></tr>
<tr><td rowspan="5">Q420</td><td>A</td><td rowspan="5">520～680</td><td rowspan="5">420</td><td rowspan="5">400</td><td rowspan="5">380</td><td rowspan="2">18</td><td>—</td><td>—</td></tr>
<tr><td>B</td><td>+20</td><td rowspan="3">34</td></tr>
<tr><td>C</td><td rowspan="3">19</td><td>0</td></tr>
<tr><td>D</td><td>−20</td></tr>
<tr><td>E</td><td>−40</td><td>27</td></tr>
</table>

续表

牌号	质量等级	抗拉强度 R_m（MPa）	下屈服强度 R_{eL}^a（MPa）公称壁厚 S			断后伸长率[b] A（%）	冲击试验	
			S≤16mm	16mm<S≤30mm	S>30mm		温度（℃）	吸收能量（kV_1/J）
			不小于					不小于
Q460	C	550～720	460	440	420	17	0	34
	D						−20	
	E						−40	27
Q500	C	610～770	500	480	440	17	0	55
	D						−20	47
	E						−40	31
Q550	C	670～830	550	530	490	16	0	55
	D						−20	47
	E						−40	31
Q620	C	710～880	620	590	550	15	0	55
	D						−20	47
	E						−40	31
Q690	C	770～940	690	660	620	14	0	55
	D						−20	47
	E						−40	31

[a] 拉伸试验时，如不能测定 R_{eL}，可测定 $R_{p0.2}$ 代替 R_{eL}。

[b] 如合同中无特殊规定，拉伸试验试样可沿钢管纵向或横向截取，如有分歧时，拉伸试验应以沿钢管纵向截取的试样作为仲裁试样。

表 F-22　　合金钢管的力学性能

序号	牌号	推荐的热处理制度[a]					拉伸性能[b]			钢管退火或高温回火交货状态布氏硬度 HBW
		淬火（正火）			回火		抗拉强度 R_m（MPa）	下屈服强度[f] R_{eL}（MPa）	断后伸长率 A（%）	
		温度（℃）		冷却剂	温度（℃）	冷却剂				
		第一次	第二次				不小于			不大于
1	40Mn2	840	—	水、油	540	水、油	885	735	12	217
2	45Mn2	840	—	水、油	550	水、油	885	735	10	217
3	27SiMn	920	—	水	450	水、油	980	835	12	217
4	40MnB[b]	850	—	油	500	水、油	980	785	10	207
5	45MnB[b]	840	—	油	500	水、油	1030	835	9	217
6	20Mn2B[b,e]	880	—	油	200	水、空	980	785	10	187
7	20Cr[c,e]	880	880	水、油	200	水、空	835	540	10	179
							785	490	10	179
8	30Cr	860	—	油	500	水、油	885	685	11	187
9	35Cr	860	—	油	500	水、油	930	735	11	207

续表

序号	牌号	推荐的热处理制度[a]					拉伸性能[b]			钢管退火或高温回火交货状态布氏硬度 HBW
		淬火（正火）			回火		抗拉强度 R_m（MPa）	下屈服强度[g] R_{eL}（MPa）	断后伸长率 A（%）	
		温度（℃）		冷却剂	温度（℃）	冷却剂	不小于			不大于
		第一次	第二次							
10	40Cr	850	—	油	520	水、油	980	785	9	207
11	45Cr	840	—	油	520	水、油	1030	835	9	217
12	50Cr	830	—	油	520	水、油	1080	930	9	229
13	38CrSi	900	—	油	600	水、油	980	835	12	255
14	20CrMo[c,e]	880	—	水、油	500	水、油	885	685	11	197
							845	635	12	197
15	35CrMo	850	—	油	550	水、油	980	835	12	229
16	42CrMo	850	—	油	560	水、油	1080	930	12	217
17	38CrMoAl[d]	940	—	水、油	640	水、油	980	835	12	229
							930	785	14	229
18	50CrVA	860	—	油	500	水、油	1275	1130	10	255
19	20CrMn	850	—	油	200	水、空	930	735	10	187
20	20CrMnSi[f]	880	—	油	480	水、油	785	635	12	207
21	30CrMnSi[c,e]	880	—	油	520	水、油	1080	885	8	229
							980	835	10	229
22	35CrMnSiA[e]	880	—	油	230	水、空	1620	—	9	229
23	20CrMnTi[d,e]	880	870	油	200	水、空	1080	835	10	217
24	30CrMnTi[d,e]	880	850	油	200	水、空	1470	—	9	229
25	12CrNi2	860	780	水、油	200	水、空	785	590	12	207
26	12CrNi3	860	780	油	200	水、空	930	685	11	217
27	12Cr2Ni4	860	780	油	200	水、空	1080	835	10	269
28	40CrNiMoA	850	—	油	600	水、油	980	835	12	269
29	45CrNiMoVA	860	—	油	460	油	1470	1325	7	269

[a] 表中所列热处理温度允许调整范围：淬火±15℃，低温回火±20℃，高温回火±50℃。

[b] 拉伸试验时，可截取横向或纵向试样，有异议时，以纵向试样为仲裁依据。

[c] 含硼钢在淬火前可先正火，正火温度应不高于其淬火温度。

[d] 按需方指定的一组数据交货，当需方未指定时，可按其中任一组数据交货。

[e] 含铬锰钛钢第一次淬火可用正火代替。

[f] 于 280～320℃等温淬火。

[g] 拉伸试验时，如不能测定 R_{eL}，可测定 $R_{p0.2}$ 代替 R_{eL}。

F.3.3.5 工艺性能

牌号为 10、15、20、25、20Mn、25Mn、Q345、Q390，公称外径大于 22～600mm，并且壁厚与外径比值不大于 10%的钢管，应进行压扁试验。钢管压扁后其平板间距应符合表 F-23 的规定。

压扁后试样不得出现裂缝或裂口。

表 F-23　　钢管压扁平板间距离

牌号	压扁试验平板间距*
10、15、250、25	$D\times2/3$
Q345、Q390、20Mn、25Mn	$D\times7/8$

* 压扁试验的平板间距最小值应是钢管壁厚的 5 倍。

F.4　工字钢

热轧工字钢尺寸、外形、质量及允许偏差参见 GB/T 706—2016，该标准适用于腿部内侧有斜度的窄边热轧工字钢。

F.4.1　尺寸

截面尺寸及允许偏差。

1）工字钢的截面图示及标注符号如图 F-4 所示。

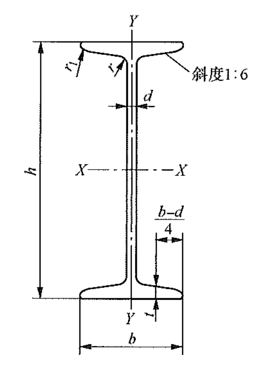


图 F-4　工字钢截面图

h—高度；b—腿宽度；d—腰厚度；t—平均腿厚度；r—内圆弧半径；r_1—腿端圆弧半径

2）工字钢的尺寸、截面面积、理论质量及截面特性参数应符合表 F-24 的规定。

表 F-24　　工字钢截面尺寸、截面面积、理论质量及截面特性

型号	截面尺寸（mm）						截面面积（cm²）	理论质量（kg/m）	外表面积（m²/m）	惯性矩（cm⁴）		惯性半径（cm）		截面模数（cm³）	
	h	b	d	t	r	r_1				I_x	I_y	i_x	i_y	W_x	W_y
10	100	68	4.5	7.6	6.5	3.3	14.33	11.3	0.432	245	33.0	4.14	1.52	49.0	9.72
12	120	74	5.0	8.4	7.0	3.5	17.80	14.0	0.493	436	46.9	4.95	1.62	72.7	12.7
12.6	126	74	5.0	8.4	7.0	3.5	18.10	14.2	0.505	488	46.9	5.20	1.61	77.5	12.7
14	140	80	5.5	9.1	7.5	3.8	21.50	16.9	0.553	712	64.4	5.76	1.73	102	16.1
16	160	88	6.0	9.9	8.0	4.0	26.11	20.5	0.621	1130	93.1	6.58	1.89	141	21.2
18	180	94	6.5	10.7	8.5	4.3	30.74	24.1	0.681	1660	122	7.36	2.00	185	26.0
20a	200	100	7.0	11.4	9.0	4.5	35.55	27.9	0.742	2370	158	8.15	2.12	237	31.5
20b		102	9.0				39.55	31.1	0.746	2500	169	7.96	2.06	250	33.1
22a	220	110	7.5	12.3	9.5	4.8	42.10	33.1	0.817	3400	225	8.99	2.31	309	40.9
22b		112	9.5				46.50	36.5	0.821	3570	239	8.78	2.27	325	42.7
24a	240	116	8.0	13.0	10.0	5.0	47.71	37.5	0.878	4570	280	9.77	2.42	381	48.4
24b		118	10.0				52.51	41.2	0.882	4800	297	9.57	2.38	400	50.4
25a	250	116	8.0				48.51	38.1	0.898	5020	280	10.2	2.40	402	48.3
25b		118	10.0				53.51	42.0	0.902	5280	309	9.94	2.40	423	52.4
27a	270	122	8.5	13.7	10.5	5.3	54.52	42.8	0.958	6550	345	10.9	2.51	485	56.6
27b		124	10.5				59.92	47.0	0.962	6870	366	10.7	2.47	509	58.9
28a	280	122	8.5				55.37	43.5	0.978	7110	345	11.3	2.50	508	56.6
28b		124	10.5				60.97	47.9	0.982	7480	379	11.1	2.49	534	61.2

续表

型号	截面尺寸（mm）						截面面积（cm^2）	理论质量（kg/m）	外表面积（m^2/m）	惯性矩（cm^4）		惯性半径（cm）		截面模数（cm^3）	
	h	b	d	t	r	r_1				I_x	I_y	i_x	i_y	W_x	W_y
30a		126	9.0				61.22	48.1	1.031	8950	400	12.1	2.55	597	63.5
30b	300	128	11.0	14.4	11.0	5.5	67.22	52.8	1.035	9400	422	11.8	2.50	627	65.9
30c		130	13.0				73.22	57.5	1.039	9850	445	11.6	2.46	657	68.5
32a		130	9.5				67.12	52.7	1.084	11100	460	12.8	2.62	692	70.8
32b	320	132	11.5	15.0	11.5	5.8	73.52	57.7	1.088	11600	502	12.6	2.61	726	76.0
32c		134	13.5				79.92	62.7	1.092	12200	544	12.3	2.61	760	81.2
36a		136	10.0				76.44	60.0	1.185	15800	552	14.4	2.69	875	81.2
36b	360	138	12.0	15.8	12.0	6.0	83.64	65.7	1.189	16500	582	14.1	2.64	919	84.3
36c		140	14.0				90.84	71.3	1.193	17300	612	13.8	2.60	962	87.4
40a		142	10.5				86.07	67.6	1.285	21700	660	15.9	2.77	1090	93.2
40b	400	144	12.5	16.5	12.5	6.3	94.07	73.8	1.289	22800	692	15.6	2.71	1140	96.2
40c		146	14.5				102.1	80.1	1.293	23900	727	15.2	2.65	1190	99.6
45a		150	11.5				102.4	80.4	1.411	32200	855	17.7	2.89	1430	114
45b	450	152	13.5	18.0	13.5	6.8	111.4	87.4	1.415	33800	894	17.4	2.84	1500	118
45c		154	15.5				120.4	94.5	1.419	35300	938	17.1	2.79	1570	122
50a		158	12.0				119.2	93.6	1.539	46500	1120	19.7	3.07	1860	142
50b	500	160	14.0	20.0	14.0	7.0	129.2	101	1.543	48600	1170	19.4	3.01	1940	146
50c		162	16.0				139.2	109	1.547	50600	1220	19.0	2.96	2080	151
55a		166	12.5				134.1	105	1.667	62900	1370	21.6	3.19	2290	164
55b	550	168	14.5				145.1	114	1.671	65600	1420	21.2	3.14	2390	170
55c		170	16.5				156.1	123	1.675	68400	1480	20.9	3.08	2400	175
56a		166	12.5	21.0	14.5	7.3	135.4	106	1.687	65600	1370	22.0	3.18	2340	165
56b	560	168	14.5				146.6	115	1.691	68500	1490	21.6	3.16	2450	174
56c		170	16.5				157.8	124	1.695	71400	1560	21.3	3.16	2550	183
63a		176	13.0				154.6	121	1.862	93900	1700	24.5	3.31	2980	193
63b	630	178	15.0	22.0	15.0	7.5	167.2	131	1.866	98100	1810	24.2	3.29	3160	204
63c		180	17.0				179.8	141	1.870	102000	1920	23.8	3.27	3300	214

注　表中 r、r_1 的数据用于孔型设计，不做交货条件。

3）经供需双方协议，可供应表 F-24 中所规定的工字钢。

4）截面尺寸允许偏差。工字钢的高度（h）、腿宽度（b）、腰厚度（d）尺寸允许偏差应符合表 F-25 的规定。

表 F-25　　工字钢、槽钢尺寸、外形允许偏差　　mm

项目		允许偏差	图示
高度（h）	$h<100$	±1.5	
	$100\leqslant h<200$	±2.0	
	$200\leqslant h<400$	±3.0	
	$h\geqslant 400$	±4.0	
腿宽度（b）	$h<100$	±1.5	
	$100\leqslant h<150$	±2.0	
	$150\leqslant h<200$	±2.5	
	$200\leqslant h<300$	±3.0	
	$300\leqslant h<400$	±3.5	
	$h\geqslant 400$	±4.0	
腰厚度（d）	$h<100$	±4.0	
	$100\leqslant h<200$	±0.5	
	$200\leqslant h<300$	±0.7	
	$300\leqslant h<400$	±0.8	
	$h\geqslant 400$	±0.9	
外缘斜度（T_1、T_2）		T_1、$T_2\leqslant 1.5\%b$ $T_1+T_2\leqslant 2.5\%b$	
弯腰挠度（W）		$W\leqslant 0.15d$	

F.4.2　外形

（1）弯曲度。

工字钢每米弯曲度不大于 3mm，总弯曲度不大于总长度的 0.2%。

（2）扭转。

工字钢不得有明显的扭转。

F.4.3　质量及允许偏差

（1）工字钢按理论质量或实际质量交货。

（2）工字钢计算理论质量时，钢的密度为 7.85g/cm³。

（3）工字钢截面面积的计算公式为

$$hd+2t(b-d)+0.615(r^2-r_1^2) \qquad \text{(F-5)}$$

式中符号见图 F-4。

（4）根据双方协议，工字钢每米质量允许偏差不得超过+5%～−5%。

F.5　钢筋混凝土用钢筋

F.5.1　钢筋混凝土用热轧光圆钢筋

GB 1499.1—2017 适用于钢筋混凝土用热轧直条、

盘卷光圆钢筋，不适用于由成品钢材再次轧制成的再生钢筋。

热轧光圆钢筋，指经热轧成型，横截面通常为圆形，表面光滑的成品钢筋。

钢筋按屈服强度特征值分为 300 级别，牌号为 HPB300。

F.5.1.1 尺寸及公称质量

（1）公称直径范围及推荐直径。钢筋的公称直径范围为 6～22mm，推荐的钢筋公称直径为 6、8、10、12、16、20mm。

（2）公称截面积与公称质量。钢筋的公称横截面积与公称质量列于表 F-26。

表 F-26 钢筋截面及质量表

公称直径（mm）	公称面积（mm²）	公称质量（kg/m）
6	28.27	0.222
8	50.27	0.395
10	78.54	0.617
12	113.1	0.888
14	153.9	1.21
16	201.1	1.58
18	254.5	2.00
20	314.2	2.47
22	380.1	2.98

注 表中公称质量密度按 7.85g/cm³ 计算。

（3）光圆钢筋的截面形状如图 F-5 所示。

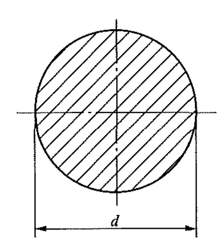


图 F-5 光圆钢筋截面形状图

（4）长度。

1）钢筋可按直条或盘卷交货。

2）直条钢定尺长度应在合同中注明。

F.5.1.2 牌号及化学成分

（1）钢的牌号及化学成分（熔炼分析）应符合表 F-27 的规定。

（2）钢中残余元素铬、镍、铜含量应各不大于 0.30%，供方如能保证可不做分析。

表 F-27 钢筋牌号及化学成分表

牌号	化学成分（质量分数）（%，不大于）				
	C	Si	Mn	P	S
HPB300	0.25	0.55	1.50	0.045	0.045

F.5.1.3 力学性能、工艺性能

钢筋的屈服强度 R_{eL}、抗拉强度 R_m、断后伸长率 A、最大力总伸长率 A_{gt} 等力学性能特征值应符合表 F-28 的规定。表 F-28 所列各力学性能特征值，可作为交货检验的最小保证值。按表 F-28 规定的弯芯直径弯曲 180°后，钢筋受弯曲部位表面不得产生裂纹。

表 F-28 圆钢筋力学、工艺性能表

牌号	R_{eL}（MPa）	R_m（MPa）	A（%）	A_{gt}（%）	冷弯试验 180° d-弯芯直径 a-钢筋公称直径
	不小于				
HPB300	300	420	25.0	10.0	$d=a$

F.5.2 钢筋混凝土用热轧带肋钢筋

GB 1499.2—2018 适用于钢筋混凝土用热轧带肋钢筋，不适用于由成品钢材再次轧制成的再生钢筋。

钢筋混凝土用热轧带肋钢筋是指钢筋混凝土配筋用的直条或盘条状钢材，交货状态分为直条和盘卷两种。规格用公称直径的毫米数表示。公称直径相当于截面相等的光圆钢筋的公称直径。公称直径为 6～50mm。

（1）术语。

1）热轧钢筋，经热轧成型并自然冷却的成品钢筋。

2）带肋钢筋，横截面通常为圆形，且表面带肋的混凝土用钢筋。

3）月牙肋钢筋，横肋的纵截面呈月牙形，且与纵肋不相交的钢筋。

4）纵肋，平行于钢筋轴线的均匀连续肋。

5）横肋，与钢筋轴线不平行的其他肋。

6）带肋钢筋的公称直径，与钢筋的公称横截面积相等的圆直径。

7）带肋钢筋的相对肋面积，横肋在与钢筋轴线垂直平面上的投影面积与钢筋公称周长和横肋间距的乘积之比。

（2）分类、牌号。

钢筋按屈服强度特征值分为 400、500、600 级。钢筋牌号的构成及其含义见表 F-29。

表 F-29　热轧带肋钢筋牌号

类别	牌号	牌号构成	英文字母含义
普通热轧钢筋	HRB400	由 HRB+屈服强度特征值构成	HRB——热轧带肋钢筋的英文（Hot rolled Ribbed Bars）缩写。E——地震的英文（Earthquake）首位字母
	HRB500		
	HRB600		
	HRB400E	由 HRB+屈服强度特征值+E 构成	
	HRB500E		
细晶粒热轧钢筋	HRBF400	由 HRBF+屈服强度特征值构成	HRBF——在热轧带肋钢筋的英文缩写后加“细”的英文（Fine）首位字母。E——地震的英文（Earthquake）首位字母
	HRBF500		
	HRBF400E	由 HRBF+屈服强度特征值+E 构成	
	HRBF500E		

F.5.2.1　尺寸及公称质量

（1）公称直径范围及推荐直径。钢筋的公称直径范围为 8～50mm，GB 1499.2—2018 推荐的钢筋公称直径为 8、10、12、16、20、25、32mm 和 40mm。

（2）公称横截面积与公称质量列于表 F-30。

表 F-30　带肋钢筋截面及理论质量表

公称直径（mm）	公称横截面面积（mm^2）	理论质量（kg/m）
6	28.27	0.222
8	50.27	0.395
10	78.54	0.617
12	113.1	0.888
14	153.9	1.21
16	201.1	1.58
18	254.5	2.00
20	314.2	2.47
22	380.1	2.98
25	490.9	3.85
28	615.8	4.83
32	804.2	6.31
36	1018	7.99
40	1257	9.87
50	1964	15.42

注　表中理论质量按密度为 7.85g/cm^3，计算。

（3）长度。

1）钢筋通常按定尺长度交货，具体交货长度应在合同中注明。

2）钢筋可以盘卷交货，每盘应是一条钢筋，允许每批有 5%的盘数（不足两盘时可有两盘）由两条钢筋组成。其盘重及盘径由供需双方协商确定。

F.5.2.2　牌号及化学成分

（1）钢的牌号及化学成分（熔炼分析）符合表 F-31 的规定。

表 F-31　钢筋的牌号及化学成分表

牌号	化学成分（质量分数）（%）					碳当量（%）
	C	Si	Mn	P	S	
	不大于					
HRB400 HRBF400 HRB400E HRBF400E	0.25	0.80	1.60	0.045	0.045	0.54
HRB500 HRBF500 HRB500E HRBF500E						0.55
HRB600	0.28					0.58

（2）钢筋的化学成分允许偏差应符合 GB/T 222 的规定，碳当量的允许偏差为+0.03%。

F.5.2.3　力学性能、工艺性能

（1）钢筋的力学性能应符合表 F-32 的规定。

钢筋的下屈服强度 R_{el}、抗拉强度 R_m、断后伸长率 A、最大力总伸长率 A_{gt} 等力学性能特征值应符合表 F-32 的规定。表 F-32 中所列各力学性能特征值，除 R°_{el}/R_{el} 可作为交货检验的最大保证值外，其他力学特征值可作为交货检验的最小保证值。

表 F-32　钢筋的力学性能表

牌号	下屈服强度 R_{el}（MPa）	抗拉强度 R_m（MPa）	断后伸长率 A（%）	最大力总延伸率 A_{gt}（%）	$R^{\circ}_m/R^{\circ}_{el}$	R°_{el}/R_{el}
	不小于					不大于
HRB400 HRBF400	400	540	16	7.5	—	—
HRB400E HRBF400E			—	9.0	1.25	1.30
HRB500 HRBF500	500	630	15	7.5	—	—
HRB500E HRBF500E			—	9.0	1.25	1.30
HRB600	600	730	14	7.5	—	—

注　R°_m 为钢筋实测抗拉强度；R°_{el} 为钢筋实测下屈服强度。

（2）公称直径 28～40 mm 各牌号钢筋的断后伸长率 A 可降低 1%；公称直径大于 40 mm 各牌号钢筋的断后伸长率 A 可降低 2%。

（3）弯曲性能。按表 F-33 规定的弯曲压头直径弯

曲 180° 后，钢筋受弯曲部位表面不得产生裂纹。

表 F-33　钢筋弯芯直径表

牌号	公称直径 d	弯曲压头直径
HRB400 HRBF400 HRB400E HRBF400E	6～25	4d
	28～40	5d
	>40～50	6d
HRB500 HRBF500 HRB500E HRBF500E	6～25	6d
	28～40	7d
	>40～50	8d
HRB600	6～25	6d
	28～40	7d
	>40～50	8d

F.5.3　钢筋混凝土用余热处理钢筋

GB 13014—2013 适用于钢筋混凝土用表面淬火并自回火处理的钢筋，不适用于由成品钢材再次轧制成的再生钢筋。有关内容摘录如下。

（1）术语。

余热处理钢筋，热轧后利用热处理原理进行表面控制冷却，然后利用芯部余热自身完成回火处理所得的成品钢筋。

（2）分类、牌号。钢筋混凝土用余热处理带钢筋按屈服强度特征值分为 400 级、500 级，按用途分为可焊和非可焊。钢筋的牌号及其含义见表 F-34。

表 F-34　钢筋的牌号及其含义表

类别	牌号	牌号构成	英文字母含义
余热处理钢筋	RRB400	由 RRB+规定的屈服强度特征值构成	RRB—余热处理钢筋的英文缩写；W—焊接的英文缩写
	RRB500		
	RRB400W	由 RRB+规定的屈服强度特征值+可焊	

F.5.3.1　尺寸及质量

（1）公称直径范围及推荐直径。钢筋的公称直径范围为 8～50mm，RRB400、RRB500 钢筋的推荐直径为 8、10、12、16、20、25、32、40、50mm，RRB400W 钢筋的推荐直径为 8、10、12、16、20、25、32、40mm。

（2）公称横截面积与理论质量。钢筋的公称横截面积与理论质量见表 F-35。

表 F-35　钢筋公称横截面积与理论质量表

公称直径（mm）	公称横截面面积（mm^2）	理论质量（kg/m）
8	50.27	0.395
10	78.54	0.617
12	113.1	0.888
14	153.9	1.21
16	201.1	1.58
18	254.5	2.00
20	314.2	2.47
22	380.1	2.98
25	490.9	3.85
28	615.8	4.83
32	804.2	6.31
36	1018	7.99
40	1257	9.87
50	1964	15.42

注　表中理论质量按密度为 7.85g/cm^3 计算。

（3）长度。

1）钢筋通常按定尺长度交货，具体交货长度应在合同中注明。

2）钢筋可以盘卷交货，每盘应是一条钢筋，允许每批有 5%的盘数（不足两盘时可有两盘）由两条钢筋组成。其盘重及盘径由供需双方协商确定。

F.5.3.2　牌号及化学成分

（1）钢的牌号及化学成分（熔炼分析）符合表 F-36 的规定。

表 F-36　钢筋的牌号及化学成分表

牌号	化学成分（%）					
	C	Si	Mn	P	S	碳当量
RRB400 RRB500	0.30	1.00	1.60	0.045	0.045	—
RRB400W	0.25	0.80	1.60	0.045	0.045	0.50

（2）钢筋的化学成分允许偏差应符合 GB/T 222 的规定。

F.5.3.3　力学性能

钢筋的力学性能应符合表 F-37 的规定。

表 F-37　钢筋的力学性能表

牌号	R_{el}（MPa）	R_m（MPa）	A（%）	A_{gt}（%）
	不小于			
RRB400	400	540	14	5.0
RRB500	500	630	13	
RRB400W	430	570	16	7.5

F.5.3.4 弯曲性能

按表 F-38 规定的弯芯直径弯曲 180° 后，钢筋受弯曲部位表面不得产生裂纹。

表 F-38　　钢筋弯芯直径表

牌号	公称直径 d	弯芯直径
RRB400 RRB400W	8～25	$4d$
	28～40	$5d$
RRB500	8～25	$6d$

F.5.4 预应力混凝土用钢棒

根据 GB/T 5223.3—2017，按钢棒表面形状分为光圆钢棒、螺旋槽钢棒、螺旋肋钢棒、带肋钢棒四种。

代号分别如下：

预应力混凝土用钢棒 PCB、光圆钢棒 P、螺旋槽钢棒 HG、螺旋肋钢棒 HR、带肋钢棒 R、低松弛 L。

钢棒的力学性能及工艺性能应符合表 F-39 的规定。

表 F-39　　钢棒的力学性能和工艺性能表

表面形状类型	公称直径 D_a（mm）	抗拉强度 R_m（MPa，不小于）	规定塑性延伸强度 $R_{p4.2}$（MPa，不小于）	弯曲性能		应力松弛性能	
				性能要求	弯曲半径（mm）	初始应力为公称抗拉强度的百分数（%）	1000h 应力松弛率（r/%，不大于）
光圆	6	1080	930	反复弯曲不小于 4 次	15	60	1.0
	7	1230	1080		20	70	2.0
	8	1420	1280		20	80	4.5
	9	1570	1420		25		
	10				25		
	11			弯曲 160°～180° 后弯曲处无裂纹	变曲压头直径为钢棒公称直径的 10 倍		
	12						
	13						
	14						
	15						
	16						
螺旋槽	7.1	1080	930	—		60	1.0
	9.0	1230	1080			70	2.0
	10.7	1420	1280			80	4.5
	12.6	1570	1420				
	14.0						
螺旋肋	6	1080	930	反复弯曲不小于 4 次/180°	15		
	7	1230	1080		20		
	8	1420	1280		20		
	9	1570	1420		25		
	10				25		
	11			弯曲 160°～180° 后弯曲处无裂纹	弯曲压头直径为钢棒公称直径的 10 倍		
	12						
	13						
	14						
	16	1080	930				

续表

表面形状类型	公称直径 D_a（mm）	抗拉强度 R_m（MPa，不小于）	规定塑性延伸强度 $R_{p4.2}$（MPa，不小于）	弯曲性能		应力松弛性能	
				性能要求	弯曲半径（mm）	初始应力为公称抗拉强度的百分数（%）	1000h 应力松弛率（r/%，不大于）
螺旋肋	18	1270	1140	弯曲 160°～180°后弯曲处无裂纹	弯曲压头直径为钢棒公称直径的 10 倍		
	20						
	22						
带肋钢棒	6	1080	930	—			
	8	1230	1080				
	10	1420	1280				
	12	1570	1420				
	14						
	16						

F.5.5　预应力混凝土用钢丝

预应力混凝土用钢丝简称预应力钢丝，是以优质碳素结构钢盘条为原料，经铅淬火索氏体化、酸洗、冷拉制成的用作预应力混凝土骨架的钢丝。钢丝的抗拉强度比热轧建筑用圆钢、螺纹钢材高 1～2 倍，在构件中采用预应力钢丝可收到节省钢材、减少构件截面和节省混凝土的效果，主要用作桥梁、吊车梁、电杆、管桩、楼板、轨枕、大口径管道等预应力混凝土构件中的预应力钢筋。根据 GB/T 5223—2014，摘录如下。

F.5.5.1　分类、代号

（1）按加工状态分为冷拉钢丝和消除应力钢丝两类。其代号为：冷拉钢丝 WCD、低松弛钢丝 WLR。

（2）按外形分为光圆、螺旋肋、刻痕三种。其代号为：光圆钢丝 P、螺旋肋钢丝 H、刻痕钢丝 I。

F.5.5.2　尺寸、外形、质量及允许偏差

（1）光圆钢丝的尺寸及允许偏差应符合表 F-40 的规定。

（2）螺旋肋钢丝的尺寸及允许偏差应符合表 F-41 的规定，钢丝的公称截面积、每米理论质量与光圆钢丝相同。

表 F-40　光圆钢丝的尺寸及允许偏差、每米理论质量

公称直径 d_n（mm）	直径允许偏差（mm）	公称横截面积 S_a（mm²）	每米理论质量（g/m）
4.00	±0.04	12.57	98.6
4.80		18.10	142
5.00	±0.05	19.63	154
6.00		28.27	222
6.25		30.68	241
7.00		38.48	302
7.50		44.18	347
8.00	±0.06	50.26	394
9.00		63.62	499
9.50		70.88	556
10.00		78.54	616
11.00		95.03	746
12.00		113.1	888

表 F-41　螺旋肋钢丝的尺寸及允许偏差

公称直径 d_a（mm）	螺旋肋数量（条）	基圆尺寸		外轮廓尺寸		单肋尺寸	螺旋肋导程（C/mm）
		基圆尺寸 D_1（mm）	允许偏差（mm）	外轮廓直径 D（mm）	允许偏差（mm）	宽度（a/mm）	
4.00	4	3.85	±0.05	4.25	±0.05	0.90～1.30	24～30
4.80	4	4.60		5.10		1.30～1.70	28～36
5.00	4	4.80		5.30			

续表

公称直径 d_n（mm）	螺旋肋数量（条）	基圆尺寸		外轮廓尺寸		单肋尺寸	螺旋肋导程（C/mm）
		基圆尺寸 D_1（mm）	允许偏差（mm）	外轮廓直径 D（mm）	允许偏差（mm）	宽度（a/mm）	
6.00	4	5.80	±0.05	6.30	±0.05	1.60～2.00	30～38
6.25	4	6.00		6.70			30～40
7.00	4	6.73		7.46	±0.10	1.80～2.20	35～45
7.50	4	7.26		7.96		1.90～2.30	36～46
8.00	4	7.75		8.45		2.00～2.40	40～50
9.00	4	8.75		9.45		2.10～2.70	42～52
9.50	4	9.30		10.10		2.20～2.80	44～53
10.00	4	9.75		10.45		2.50～3.00	45～58
11.00	4	10.76		11.47		2.60～3.10	50～64
12.00	4	11.78		12.50		2.70～3.20	55～70

（3）三面刻痕钢丝的尺寸及允许偏差应符合表F-42的规定，钢丝的公称截面积、每米理论质量与光圆钢丝相同。

表 F-42　　三面刻痕钢丝的尺寸及允许偏差

公称直径 d_n（mm）	刻痕深度		刻痕长度		节距	
	公称深度 a（mm）	允许偏差（mm）	公称长度 b（mm）	允许偏差（mm）	公称节距 L（mm）	允许偏差（mm）
≤5.00	0.12	±0.05	3.5	±0.5	5.5	±0.5
＞5.00	0.15		5.0		8.0	

注　公称直径指横截面积等同于光圆钢丝横截面积时所对应的直径。

F.5.5.3　力学性能

（1）压力管道用无涂（镀）层冷拉钢丝的力学性能应符合表F-43的规定。0.2%屈服力 $F_{p0.2}$ 应不小于最大力的特征值 F_m 的75%。

表 F-43　　压力管道用冷拉钢丝的力学性能

公称直径 d_n（mm）	公称抗拉强度 R_m（MPa）	最大力的特征值 F_m（kN）	最大力的最大值 $F_{m,max}$（kN）	0.2%屈服力 $F_{p0.2}$（kN，≥）	每210mm扭矩的扭转次数 N（次，≥）	断面收缩率 Z（%，≥）	氢脆敏感性能负载为70%最大力时，断裂时间 t（h，≥）	应力松弛性能初始力为最大力70%时，1000h应力松弛率 r（%，≤）
4.00	1470	18.48	20.99	13.86	10	35	75	7.5
5.00		28.86	32.79	21.65	10	35		
6.00		41.56	47.21	31.17	8	30		
7.00		56.57	64.27	42.42	8	30		
8.00		73.88	83.93	55.41	7	30		
4.00	1570	19.73	22.24	14.80	10	35		
5.00		30.82	34.75	23.11	10	35		
6.00		44.38	50.03	33.29	8	30		
7.00		60.41	68.11	45.31	8	30		
8.00		78.91	88.96	59.18	7	30		

续表

公称直径 d_n（mm）	公称抗拉强度 R_m（MPa）	最大力的特征值 F_m（kN）	最大力的最大值 $F_{m,max}$（kN）	0.2%屈服力 $F_{p0.2}$（kN，≥）	每 210mm 扭矩的扭转次数 N（次，≥）	断面收缩率 Z（%，≥）	氢脆敏感性能负载为 70%最大力时，断裂时间 t（h，≥）	应力松弛性能初始力为最大力 70%时，1000h 应力松弛率 r（%，≤）
4.00		20.99	23.50	15.74	10	35		
5.00		32.78	36.71	24.59	10	35		
6.00	1670	47.21	52.86	35.41	8	30		
7.00		64.26	71.96	48.20	8	30		
8.00		83.93	93.99	62.95	6	30	75	7.5
4.00		22.25	24.76	16.69	10	35		
5.00	1770	34.75	38.68	26.06	10	35		
6.00		50.04	55.69	37.53	8	30		
7.00		68.11	75.81	51.08	6	30		

（2）消除应力的光圆及螺旋肋钢丝的力学性能应符合表 F-44 的规定。0.2%屈服力 $F_{p0.2}$ 应不小于最大力的特征值 F_m 的 88%。

表 F-44　　消除应力光圆及螺旋肋钢丝的力学性能

公称直径 d_n（mm）	公称抗拉强度 R_m（MPa）	最大力的特征值 F_m（kN）	最大力的最大值 $F_{m,max}$（kN）	0.2%屈服力 $F_{p0.2}$（kN，≥）	最大力总伸长率（L_c=200mm）A_{ce}（%，≥）	反复弯曲性能		应力松弛性能	
						弯曲次数（次/180°，≥）	弯曲半径 R（mm）	初始力相当于实际最大力的百分数（%）	1000h 应力松弛率 r（%，≤）
4.00		18.48	20.99	16.22		3	10		
4.80		26.61	30.23	23.35		4	15		
5.00		28.86	32.78	25.32		4	15		
6.00		41.56	47.21	36.47		4	15		
6.25		45.10	51.24	39.58		4	20		
7.00		56.57	64.26	49.64		4	20		
7.50	1470	64.94	73.78	56.99		4	20	70	2.5
8.00		73.88	83.93	64.84	3.5	4	20		
9.00		93.52	106.25	82.07		4	25		
9.50		104.19	118.37	91.44		4	25	80	4.5
10.00		115.45	131.16	101.32		4	25		
11.00		139.69	158.70	122.59		—	—		
12.00		166.26	188.88	145.90		—	—		
4.00		19.73	22.24	17.37		3	10		
4.80	1570	28.41	32.03	25.00		4	15		
5.00		30.82	34.75	27.12		4	15		

续表

公称直径 d_n（mm）	公称抗拉强度 R_m（MPa）	最大力的特征值 F_m（kN）	最大力的最大值 $F_{m,max}$（kN）	0.2%屈服力 $F_{p0.2}$（kN，≥）	最大力总伸长率（L_e=200mm）A_{ce}（%，≥）	反复弯曲性能		应力松弛性能	
						弯曲次数（次/180°，≥）	弯曲半径 R（mm）	初始力相当于实际最大力的百分数（%）	1000h 应力松弛率 r（%，≤）
6.00	1570	44.38	50.03	39.06		4	15		
6.25		48.17	54.31	42.39		4	20		
7.00		60.41	68.11	53.16		4	20		
7.50		69.36	78.20	61.04		4	20		
8.00		78.91	88.96	69.44		4	20		
9.00		99.88	112.60	87.89		4	25		
9.50		111.28	125.46	97.93		4	25		
10.00		123.31	139.02	108.51		4	25		
11.00		149.20	168.21	131.30		—	—		
12.00		177.57	200.19	156.26		—	—		
4.00	1670	20.99	23.50	18.47		3	10		
5.00		32.78	36.71	28.85		4	15		
6.00		47.21	52.86	41.54		4	15	70	2.5
6.25		51.24	57.38	45.09	3.5	4	20		
7.00		64.26	71.96	56.55		4	20	80	4.5
7.50		73.78	82.62	64.93		4	20		
8.00		83.93	93.98	73.86		4	20		
9.00		106.25	118.97	93.50		4	25		
4.00	1770	22.25	24.76	19.58		3	10		
5.00		34.75	38.68	30.58		4	15		
6.00		50.04	55.69	44.03		4	15		
7.00		68.11	75.81	59.94		4	20		
7.50		78.20	87.04	68.81		4	20		
4.00	1860	23.38	25.89	20.57		3	10		
5.00		36.51	40.44	32.13		4	15		
6.00		52.58	58.23	46.27		4	15		
7.00		71.57	79.27	62.98		4	20		

（3）消除应力的刻痕钢丝的力学性能，除弯曲次数外其他应符合表 F-44 的规定。对所有规格消除应力的刻痕钢丝，其弯曲次数均应不小于 3 次。

F.6 焊接材料

F.6.1 焊接材料的种类

焊接材料的种类见表 F-45。

表 F-45 焊接材料种类表

类别	名称	用 途
电焊条	结构钢电焊条 钼和铬钼耐热钢电焊条 低温钢电焊条 铬不锈钢电焊条 奥氏体不锈钢电焊条 堆焊电焊条 铸铁电焊条 铜及铜合金电焊条 镍及镍合金电焊条 铝及铝合金电焊条 特殊用途电焊条	焊接碳钢、普通低合金钢、铸钢用 焊接珠光体钢、马氏体钢等耐热钢用 低温钢电焊条 焊接铬不锈钢用 焊接铬镍不锈钢用 用于修复工件被磨损、腐蚀的表面和制造耐磨、耐蚀、耐热特殊合金表面层 焊接一般灰口铸铁、高强度铸铁、耐热铸铁、可锻铸铁、球墨铸铁用 焊接铜及铜合金用 焊接镍及镍合金用 焊接铝及铝合金用 作特殊用途，如水下焊接、水下切割及铸铁件焊补前开坡口用
自动焊及电渣焊用焊丝	碳素结构钢焊丝 合金结构钢焊丝 不锈钢焊丝	自动焊或电渣焊焊接碳素钢用，亦用于气焊 自动焊或电渣焊焊接碳素钢、普低钢和合金结构钢用
埋弧自动焊及电渣焊用焊剂	熔炼型焊剂 烧结型焊剂 陶质型焊剂	用于自动焊、半自动焊和电渣焊焊接碳素钢、低合金钢、高合金钢及各种合金用

F.6.2 结构钢电焊条

F.6.2.1 型号编制方法

焊条型号由五部分构成：

a）第一部分用字母“E”表示焊条；

b）第二部分为字母“E”后面的紧邻两位数，表示熔敷金属的最小抗拉强度代号，见表 F-46；

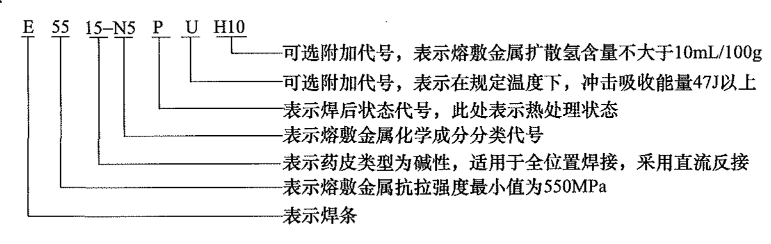
c）第三部分为字母“E”后面的第三和第四两位数字，表示药皮类型、焊接位置和电流类型；

d）第四部分为熔敷金属的化学成分分类代号，可为“无标记”或短划“-”后的字母、数字或字母和数字的组合；

e）第五部分为熔敷金属的化学成分代号之后的焊接状态代号，其中“无标记”表示焊态，“P”表示热处理状态，“AP”表示焊态和焊后热处理两种状态均可。

电焊条的牌号表示方法举例如下：

示例1：



示例2：

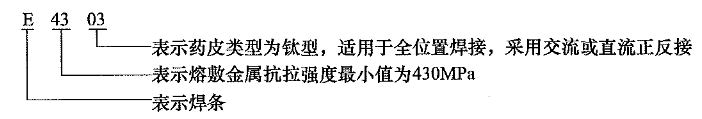


表 F-46 熔敷金属抗拉强度代号表

抗拉强度代号	最小抗拉强度值（MPa）
43	430
50	490
55	550
57	570
62	620

F.6.2.2 结构钢电焊条的使用说明

要做好焊接工作，必须对施焊工作的材质、焊接设备的性能和所用焊接材料的性能都有所了解，并做出恰当的选择和配合，才能保证焊接成品的质量。不同的钢种要求选用不同类别的电焊条，而同一钢种又因焊件的工作条件、工作环境、结构形状等的差别，也要求选用不同品种的电焊条。一般可按结构钢的强度选择相应强度等级的电焊条。随着结构钢强度的增高、焊接裂缝倾向也随之加大，因此必须采取相应措施如下：

（1）碳钢的焊接。

1）低碳钢，焊接性能较好，一般不易产生焊接裂缝，故无须采取特别措施。

2）中碳钢，由于含碳量的增加，逐渐有发生焊接裂缝的倾向。防治方法是选用低氢型焊条或焊缝金属具有好塑性及高韧性的焊条，必要时可将焊件以预热处理。

（2）普通低合金钢的焊接。我国目前推广使用的16锰、16锡加稀土、16锰铜、15锰钛、15锰钛铜、09锰2、09锰2铜、10锰硅铜等普通低合金钢都具有较好的焊接性能，可选用相应强度的电焊条焊接。普低钢的淬硬和冷裂纹倾向大，氢含量是产生冷裂纹的因素之一。因此普低钢焊接最好选用碱性低氢焊条。对某些可焊性较差的普低钢和低合金高强度钢，在焊接时还应采取相应的工艺措施，防止开裂。

（3）铸钢的焊接。铸钢含碳量一般都较高，且厚度大，形状复杂，极易产生焊接裂缝，特别是铸钢中合金元素含量多时更为突出，所以在施焊中应特别注意。

结构钢电焊条根据药皮不同，大体分为酸性和碱性低氢型两大类。根据低氢型焊条的特点，在焊接中必须注意以下事项：

（1）施焊前应将焊条经300～350℃左右烘焙1h，随烘随用。

（2）焊前必须对焊件清除铁锈、油污、水分等杂质。

（3）焊接时须用短弧操作，以窄焊道为宜。

（4）用直流电源时，焊条接正极。

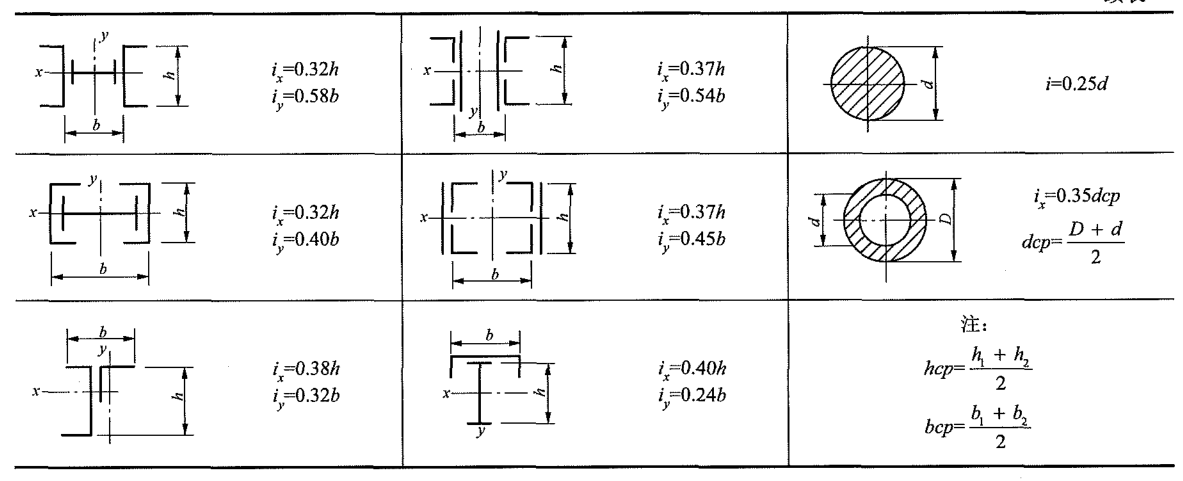
F.7 常用型钢组合截面回转半径近似值计算

常用型钢组合截面回转半径近似值计算图表见表F-47。

表 F-47　　常用型钢组合截面回转半径近似值计算图表

$i_x=0.30h$ $i_y=0.30b$ $i_z=0.195h$	$i_x=0.30h$ $i_y=0.17b$	$i_x=0.40h$ $i_y=0.21b$
$i_x=0.32h$ $i_y=0.28b$ $i_z=0.18\dfrac{h+b}{2}$	$i_x=0.20h$ $i_y=0.21b$	$i_x=0.43h$ $i_y=0.24b$
$i_x=0.30h$ $i_y=0.215b$	$i_x=0.21h$ $i_y=0.21b$ $i_z=0.185h$	$i_x=0.39h$ $i_y=0.29b$
$i_x=0.32h$ $i_y=0.20b$	$i_x=0.21h$ $i_y=0.21b$	$i_x=0.43h$ $i_y=0.43b$
$i_x=0.28h$ $i_y=0.24b$	$i_x=0.45h$ $i_y=0.24b$	$i_x=0.39h$ $i_y=0.20b$
$i_x=0.38h$ $i_y=0.60b$	$i_x=0.44h$ $i_y=0.32b$	$i_x=0.29h$ $i_y=0.29b$
$i_x=0.38h$ $i_y=0.44b$	$i_x=0.44h$ $i_y=0.38b$	$i_x=0.24hcp$ $i_y=0.41bcp$

续表



$i_x=0.32h$ $i_y=0.58b$	$i_x=0.37h$ $i_y=0.54b$	$i=0.25d$
$i_x=0.32h$ $i_y=0.40b$	$i_x=0.37h$ $i_y=0.45b$	$i_x=0.35dcp$ $dcp=\frac{D+d}{2}$
$i_x=0.38h$ $i_y=0.32b$	$i_x=0.40h$ $i_y=0.24b$	注： $hcp=\frac{h_1+h_2}{2}$ $bcp=\frac{b_1+b_2}{2}$

F.8　常用截面几何特性

常用截面几何特性见表 F-48。

表 F-48　　　　常用截面几何特性表

序号	断面图形	面积 A	重心位置 y	惯性力矩 I	断面系数 $W=\frac{I_x}{y}$	回转半径 $r=\sqrt{\frac{I_x}{A}}$
1		$\frac{1}{2}bh$ $=\sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)}$ $s=\frac{1}{2}(a+b+c)$	$\frac{2}{3}h$	$I_x=\frac{1}{36}bh^3$ $I_B=\frac{1}{4}bh^3$ $I_b=\frac{1}{12}bh^3$	$W_B=\frac{1}{24}bh^2$ $W_b=\frac{1}{12}bh^2$	$\frac{h}{\sqrt{18}}=0.2357h$
2		bh	$\frac{h}{2}$	$\frac{1}{12}bh^3$	$\frac{1}{6}bh^2$	$\frac{h}{\sqrt{12}}=0.289h$
3		a^2	$\frac{a}{\sqrt{2}}=0.707a$	$\frac{1}{12}a^4$	$\frac{\sqrt{2}}{12}a^3=0.118a^3$	$\frac{a}{\sqrt{12}}=0.289a$
4		$\frac{1}{2}(b_1+b)h$	$\frac{h}{3}\frac{b+2b_1}{b+b_1}$	$\frac{a^2+4bb_1+b^2}{36(b_1+b)}h^3$	$\frac{a^2+4bb_1+b^2}{12(2b_1+b)}h^2$	$\frac{h}{6(b_1+b)}\times\sqrt{2(b^2+4bb_1+b_1^2)}$
5		$\frac{3\sqrt{3}}{2}b^2=2.598b^2$	$\sqrt{\frac{3}{4}}b=0.866b$	$\frac{5\sqrt{3}}{16}b^4=0.5413b^4$	$\frac{5}{8}b^3=0.625b^3$	$\sqrt{\frac{5}{24}}b=0.456b$
6		$\pi r^2=\frac{\pi d^2}{4}$	$y=\frac{d}{2}$	$\frac{\pi r^4}{4}=\frac{\pi r^4}{64}$ $=0.05d^4$	$\frac{\pi r^3}{4}=\frac{\pi r^3}{32}=0.1d^3$	$\frac{d}{4}$
7		$\frac{\pi d^2}{8}=0.3927d^2$	$\frac{2d}{3\pi}=0.2122d$	$\frac{d^4(9\pi^2-64)}{1152\pi}$ $=0.006\,9d^4$	$\frac{d^3(9\pi^2-64)}{768}$ $=0.3233\,d^3$	$\frac{d\sqrt{9\pi^2-64}}{12\pi}$ $=0.132\,2d$

续表

序号	断面图形	面积 A	重心位置 y	惯性力矩 I	断面系数 $W=\frac{I_x}{y}$	回转半径 $r=\sqrt{\frac{I_x}{A}}$
8		$\frac{\pi hb}{4}=0.785ab$	$\frac{h}{2}$	$J_x=\frac{\pi hb^3}{64}$ $J_y=\frac{\pi hb^3}{64}$	$W_x=\frac{\pi bh^2}{32}$ $W_y=\frac{\pi bh^2}{32}$	$r_x=\frac{h}{4}$ $r_y=\frac{b}{4}$
9		$HB-hb$	$\frac{H}{2}$	$\frac{1}{12}(BH^3-bh^3)$	$\frac{1}{6H}(BH^3-bh^3)$	$\sqrt{\frac{J}{A}}$
10		$HB+hb$	$\frac{H}{2}$	$\frac{1}{12}(BH^3+bh^3)$	$\frac{1}{6H}(BH^3+bh^3)$	$\sqrt{\frac{J}{A}}$
11		$Hb+hd$	$y_1=\frac{1}{2}\frac{bH^2+bd^2}{bH+bd}$ $y_2=H-r_1$	$\frac{1}{3}(Br_1^3-hc^3+by_2^3)$	$W_1=\frac{J}{y_1}$ $W_2=\frac{J}{y_2}$	$\sqrt{\frac{J}{A}}$

F.9 钢材的机械性能

根据 GB/T 1591—2018、GB/T 700—2006，钢材机械性能见表 F-49～表 F-53。

表 F-49　　钢材机械性能表

牌号	等级	屈服强度[a] R_{eH}（N/mm²，不小于）						抗拉强度[b] R_m（N/mm²）	断后伸长率 A（%，不小于）					冲击试验（V型缺口）	
		厚度（或直径）d（mm）							厚度（或直径）d（mm）					温度（℃）	冲击吸收功（纵向）（J，不小于）
		d≤16	16＜d≤40	40＜d≤60	60＜d≤100	100＜d≤150	150＜d≤200		d≤40	40＜d≤60	60＜d≤100	100＜d≤150	150＜d≤200		
Q195	—	195	185	—	—	—	—	315～430	33	—	—	—	—	—	—
Q215	A	215	205	195	185	175	165	335～450	31	30	29	27	26	—	—
	B													+20	27
Q235	A	235	225	215	215	195	185	370～500	26	25	24	22	21	—	—
	B													+20	
	C													0	27[c]
	D													−20	
Q275	A	275	265	255	245	225	215	410～540	22	21	20	18	17	—	—
	B													+20	
	C													0	27
	D													−20	

[a] Q195 的屈服强度值仅供参考，不作为交货条件。

[b] 厚度大于 100mm 的钢材，抗拉强度下限允许降低 20N/mm²。宽带钢（包括剪切钢板）抗拉强度上限不作为交货条件。

[c] 厚度小于 25mm 的 Q235B 级钢材。如供方能保证冲击吸收功值合格，经需方同意，可不做检验。

表 F-50　热轧钢材的拉伸性能

牌号		上屈服强度 R_{eH}[a]（MPa，不小于）									抗拉强度 R_m（MPa）			
钢级	质量等级	公称厚度或直径 d（mm）												
		$d≤16$	$16<d≤40$	$40<d≤63$	$63<d≤80$	$80<d≤100$	$100<d≤150$	$150<d≤200$	$200<d≤250$	$250<d≤400$	$d≤100$	$100<d≤150$	$150<d≤250$	$250<d≤400$
Q355	B、C	355	345	335	325	315	295	285	275	—	470～630	450～600	450～600	—
	D									265[b]				450～600[b]
Q390	B、C、D	390	380	360	340	340	320	—	—	—	490～650	470～620	—	—
Q420[c]	B、C	420	410	390	370	370	350	—	—	—	520～680	500～650	—	—
Q460[c]	C	460	450	430	410	410	390	—	—	—	550～720	530～700	—	—

[a] 当屈服不明显时，可用规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}$ 代替上屈服强度。

[b] 只适用于质量等级为 D 的钢板。

[c] 只适用于型钢和棒材。

表 F-51　热 轧 钢 材 的 伸 长 率

牌号		断后伸长率 A（%，不小于）						
钢级	质量等级	公称厚度或直径 d（mm）						
		试样方向	$d≤40$	$40<d≤63$	$63<d≤100$	$100<d≤150$	$150<d≤250$	$250<d≤400$
Q355	B、C、D	纵向	22	21	20	18	17	17[a]
		横向	20	19	18	18	17	17[a]
Q390	B、C、D	纵向	21	20	20	19	—	—
		横向	20	19	19	18	—	—
Q420[b]	B、C	纵向	20	19	19	19	—	—
Q460[b]	C	纵向	18	17	17	17	—	—

[a] 只适用于质量等级为 D 的钢板。

[b] 只适用于型钢和棒材。

表 F-52　正火、正火轧制钢材的拉伸性能

牌号		上屈服强度 R_{eH}[a]（MPa，不小于）								抗拉强度 R_m（MPa）			断后伸长率 A（%，不小于）					
钢级	质量等级	公称厚度或直径 d（mm）																
		$d≤16$	$16<d≤40$	$40<d≤63$	$63<d≤80$	$80<d≤100$	$100<d≤150$	$150<d≤200$	$200<d≤250$	$d≤100$	$100<d≤200$	$200<d≤250$	$d≤16$	$16<d≤40$	$40<d≤63$	$63<d≤80$	$80<d≤200$	$200<d≤250$
Q355N	B、C、D、E、F	355	345	335	325	315	295	285	275	470～630	450～600	450～600	22	22	22	21	21	21
Q390N	B、C、D、E	390	380	360	340	340	320	310	300	490～650	470～620	470～620	20	20	20	19	19	19
Q420N	B、C、D、E	420	400	390	370	360	340	330	320	520～680	500～650	500～650	19	19	19	18	18	18

续表

牌号		上屈服强度 R_{eH}[a]（MPa，不小于）								抗拉强度 R_m（MPa）			断后伸长率 A（%，不小于）					
		公称厚度或直径 d（mm）																
钢级	质量等级	d≤16	16＜d≤40	40＜d≤63	63＜d≤80	80＜d≤100	100＜d≤150	150＜d≤200	200＜d≤250	d≤100	100＜d≤200	200＜d≤250	d≤16	16＜d≤40	40＜d≤63	63＜d≤80	80＜d≤200	200＜d≤250
Q460N	C、D、E	460	440	430	410	400	380	370	370	540~720	530~710	510~690	17	17	17	17	17	16

注 正火状态包含正火加回火状态。

[a] 当屈服不明显时，可用规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}$ 代替上屈服强度 R_{eH}。

表 F-53　　夏比（V 型缺口）冲击试验的温度和冲击吸收能量

牌号		以下试验温度的冲击吸收能量最小值 KV_2（J）									
钢级	质量等级	20℃		0℃		-20℃		-40℃		-60℃	
		纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向
Q355、Q390、Q420	B	34	27	—	—	—	—	—	—	—	—
Q355、Q390、Q420、Q460	C	—	—	34	27	—	—	—	—	—	—
Q355、Q390	D	—	—	—	—	34[a]	27[a]	—	—	—	—
Q355N、Q390N、Q420N	B	34	27	—	—	—	—	—	—	—	—
Q355N、Q390N、Q420N、Q460N	C	—	—	34	27	—	—	—	—	—	—
	D	55	31	47	27	40[b]	20	—	—	—	—
	E	63	40	55	34	47	27	31[c]	20[c]	—	—
Q355N	F	63	40	55	34	47	27	31	20	27	16
Q355M、Q390M、Q420M	B	34	27	—	—	—	—	—	—	—	—
Q355M、Q390M、Q420M、Q460M	C	—	—	34	27	—	—	—	—	—	—
	D	55	31	47	27	40[b]	20	—	—	—	—
	E	63	40	55	34	47	27	31[c]	20[c]	—	—
Q355M	F	63	40	55	34	47	27	31	20	27	16
Q500M、Q550M、Q620M、Q690M	C	—	—	55	34	—	—	—	—	—	—
	D	—	—	—	—	47[b]	27	—	—	—	—
	E	—	—	—	—	—	—	31[c]	20[c]	—	—

注 当需方未指定试验温度时，正火、正火轧制和热机械轧制的 C、D、E、F 级钢材分别做 0℃、-20℃、-40℃、-60℃冲击。冲击试验取纵向试样。经供需双方协商，也可取横向试样。

[a] 仅适用于厚度大于 250mm 的 Q355D 钢板。

[b] 当需方指定时，D 级钢可做-30℃冲击试验时，冲击吸收能量纵向不小于 27J。

[c] 当需方指定时，E 级钢可做-50℃冲击时，冲击吸收能量纵向不小于 27J、横向不小于 16J。

附录 G　螺 栓、螺 母

G.1　螺栓、铆钉连接强度

螺栓、铆钉连接强度见表 G-1 和表 G-2。

表 G-1　　　　**螺栓、螺钉的机械和物理性能**

编号	机械或物理性能		性能等级									
			4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8		9.8	10.9	12.9/12.9
								$d\leqslant$16mm	$d>$16mm	$d\leqslant$16mm		
1	抗拉强度 R_m（MPa）	公称	400		500		600	800		900	1000	1200
		min	400	420	500	520	600	800	830	900	1040	1220
2	下屈服强度 R_{eL}（MPa）	公称	240	—	300	—	—	—	—	—	—	—
		min	240	—	300	—	—	—	—	—	—	—
3	规定非比例延伸 0.2%的应力 $R_{p0.2}$（MPa）	公称	—	—	—	—	—	640	640	720	900	1080
		min	—	—	—	—	—	640	660	720	940	1100
4	紧固件实物的规定非比例延伸 0.0048d 的应力 R_{Pf}（MPa）	公称	—	320	—	400	480	—	—	—	—	—
		min	—	340	—	420	480	—	—	—	—	—
5	保证应力 S_P^f（MPa）	公称	225	310	280	380	440	580	600	650	830	970
	保证应力比	$S_{P,n}/R_{eL,min}$ 或 $S_{P,n}/R_{P0,t^2,min}$ 或 $S_{P,n}/R_{Pf,min}$	0.94	0.91	0.93	0.90	0.92	0.91	0.91	0.90	0.88	0.88
6	机械加工试件的断后伸长率 A（%）	min	22	—	20	—	—	12	12	10	9	8
7	机械加工试件的断面收缩率 Z（%）	min	—					52		48	48	44
8	紧固件实物的断后伸长率 A_f	min	—	0.24	—	0.22	0.20	—	—	—	—	—
9	头部坚固性		不得断裂或出现裂缝									
10	维氏硬度/HV，$F\geqslant$98N	min	120	130	155	160	190	250	255	290	320	385
		max	220				250	320	335	360	380	435
11	布氏硬度/HBW，F=30D^2	min	114	124	147	152	181	245	250	285	316	380
		max	209				238	316	331	355	375	429
12	洛氏硬度/HRB	min	67	71	79	82	89	—				
		max	95.0				99.5	—				
	洛氏硬度/HRC	min	—					22	23	28	32	39
		max	—					32	34	37	39	44
13	表面硬度/HV0.3	max	—					—			—	—

续表

编号	机械或物理性能		性能等级									
			4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8 $d\leqslant$ 16mm	8.8 $d>$ 16mm	9.8 $d\leqslant$ 16mm	10.9	12.9/ 12.9
14	螺纹未脱碳层的高度 E（mm）	min	—					$1/2H_1$			$2/3H_1$	$3/4H_1$
14	螺纹全脱碳层的深度 G（mm）	max	—					0.015				
15	再回火后硬度的降低值（HV）	max	—					20				
16	破坏扭矩 M_B（Nm）	min	—					按 GB/T 3098.13 的规定				
17	吸收能量 $K_v^{k,l}$（J）	min	—		27	—		27	27	27	27	
18	表面缺陷		GB/T 5779.1									GB/T 5779.3

表 G-2　　螺栓和锚栓的强度设计值　　N/mm²

材料	类别	厚度或直径（mm）	抗拉	抗压和抗弯	抗剪	孔壁承压*	
镀锌粗制螺栓（C 级）	4.8 级	标称直径 $d\leqslant39$	200	/	170	螺杆承压	420
	5.8 级	标称直径 $d\leqslant39$	240	/	210		520
	6.8 级	标称直径 $d\leqslant39$	300	/	240		600
	8.8 级	标称直径 $d\leqslant39$	400	/	300		800
	10.9 级	标称直径 $d\leqslant39$	500	/	380		900
锚栓	Q235 钢	外径≥16	160	/	/	/	
	Q345 钢	外径≥16	205	/	/	/	
	35 号优质碳素钢	外径≥16	190	/	/	/	
	45 号优质碳素钢	外径≥16	215	/	/	/	
	40Cr 合金结构钢	外径≥16	260	/	/	/	
	42CrMo 合金结构钢	外径≥16	310	/	/	/	

注　1. 8.8 级高强度螺栓应具有 A 类（塑性性能）和 B 类试验项目的合格证明。

2. 40Cr 合金结构钢、42CrMo 合金结构钢抗拉强度为热处理后的强度，热处理后的材料机械性能应满足 GB/T 3077 的要求。

* 适用于构件上螺栓端距大于等于 1.5d（d 螺栓直径）。

G.2　螺栓、铆钉连接容许距离

螺栓、铆钉连接容许距离见表 G-3。

表 G-3　　螺栓的容许间距

名称	位置和方向			最大容许距离（取两者的较小值）	最小容许距离
中心间距	任意方向	外排		$8d$ 或 $12t$	$2.5d$
		中间排	构件受压力	$12d$ 或 $18t$	
			构件受拉力	$16d$ 或 $24t$	

续表

名称	位置和方向			最大容许距离（取两者的较小值）	最小容许距离
螺栓中心至构件边缘距离	顺内力方向			4*d* 或 8*t*	1.5*d*
	垂直内力方向	切割边			1.45*d*
		轧制边	高强度螺栓		
			普通螺栓		1.25*d*

注　1. *d* 为螺栓直径，*t* 为外层较薄板的厚度。

2. 高强度螺栓是指 8.8 级及以上等级螺栓。

3. 受剪螺栓孔的直径一般比螺栓直径大 1.5mm，有特殊要求时可以仅大 1.0mm。

G.3　粗制六角头螺栓尺寸

粗制六角头螺栓尺寸见表 G-4。

表 G-4　　粗制六角头螺栓尺寸　　mm

d		1.6	2	2.5	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16	18	20
b	*l*＜125	9	10	11	12	14	16	18	20	22	26	30	34	38	42	46
	125＜*l*＜200	—	—	—	—	—	—	—	—	28	32	36	40	44	48	52
	l＞200	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	57	61	65
d		22	24	27	30	33	36	39	42	45	48	52	56	60	64	68
b	*l*＜125	50	54	60	66	72	78	84	90	96	102	—	—	—	—	—
	125＜*l*＜200	56	60	66	72	78	84	90	96	102	108	116	124	132	140	148
	l＞200	69	73	79	85	91	97	103	109	115	121	129	137	145	153	161
d		72	76	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	140	150
b	*l*＜125	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	125＜*l*＜200	156	164	172	182	192	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	l＞200	169	177	185	195	205	215	225	235	245	255	265	275	285	305	325

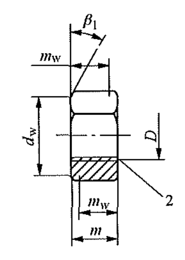
注　1. *d*—外螺纹大径。

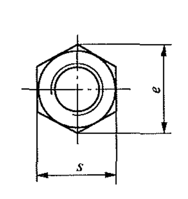
2. *b*—螺纹长度。

3. *l*—螺栓的公称长度。

G.4　粗制六角螺母尺寸

粗制六角螺母尺寸（见表 G-5～表 G-8）。





1）$\beta_1=15°\sim30°$

2）允许内倒角。

表 G-5　　粗制六角头螺母尺寸（优选的螺纹规格）　　mm

螺纹规格 D（mm）		M5	M6	M8	M10	M12	M16	M20
P[1]（mm）		0.8	1	1.25	1.5	1.75	2	2.5
d_w（mm）min		6.7	8.7	11.5	14.5	16.5	22	27.7
e（mm）min		8.63	10.89	14.20	17.59	19.85	26.17	32.95
m（mm）	max	5.6	6.4	7.9	9.5	12.2	15.9	19
	min	4.4	4.9	6.4	8	10.4	14.1	16.9
m_w（mm）min		3.5	3.7	5.1	6.4	8.3	11.3	13.5
s（mm）	公称=max	8	10	13	16	18	24	30
	min	7.64	9.64	12.57	15.57	17.57	23.16	29.16
螺纹规格 D（mm）		M24	M30	M36	M42	M48	M56	M64
P①（mm）		3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
d_w（mm）min		33.3	42.8	51.1	60	69.5	78.7	88.2
e（mm）min		39.55	50.85	60.79	71.3	82.6	93.56	104.86
m（mm）	max	22.3	26.4	31.9	34.9	38.9	45.9	52.4
	min	20.2	24.3	29.4	32.4	36.4	43.4	49.4
m_w（mm）min		16.2	19.4	23.2	25.9	29.1	34.7	39.5
s（mm）	公称=max	36	46	55	65	75	85	95
	min	35	45	53.8	63.1	73.1	82.8	92.8

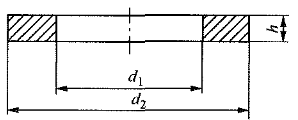
① P——螺距。

表 G-6　　粗制六角头螺母尺寸（非优选的螺纹规格）　　mm

螺纹规格 D（mm）		M14	M18	M22	M27	M33	M39	M45	M52	M60
P①（mm）		2	2.5	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5
d_w（mm）min		19.2	24.9	31.4	38	46.6	55.9	64.7	74.2	83.4
e（mm）min		22.78	29.56	37.29	45.2	55.37	66.44	76.95	88.25	99.21
m（mm）	max	13.9	16.9	20.2	24.7	29.5	34.3	36.9	42.9	48.9
	min	12.1	15.1	18.1	22.6	27.4	31.8	34.4	40.4	46.4
m_w（mm）min		9.7	12.1	14.5	18.1	21.9	25.4	27.5	32.3	37.1
s（mm）	公称=max	21	27	34	41	50	60	70	80	90
	min	20.16	26.16	33	40	49	58.8	68.1	78.1	87.8

① P——螺距。

表 G-7　　粗制垫圈尺寸（优选尺寸）　　mm



公称规格（螺纹大径 d）	内径 d_1		外径 d_2		厚度 h		
	公称（min）	max	公称（max）	min	公称	max	min
1.6	1.8	2.05	4	3.25	0.3	0.4	0.2
2	2.4	2.65	5	4.25	0.3	0.4	0.2
2.5	2.9	3.15	6	5.25	0.5	0.6	0.4

续表

公称规格（螺纹大径 d）	内径 d_1		外径 d_2		厚度 h		
	公称（min）	max	公称（max）	min	公称	max	min
3	3.4	3.7	7	6.1	0.5	0.6	0.4
4	4.5	4.8	9	8.1	0.8	1.0	0.6
5	5.5	5.8	10	9.1	1	1.2	0.8
6	6.6	6.96	12	10.9	1.6	1.9	1.3
8	9	9.36	16	14.9	1.6	1.9	1.3
10	11	11.43	20	18.7	2	2.3	1.7
12	13.5	13.93	24	22.7	2.5	2.8	2.2
16	17.5	17.93	30	28.7	3	3.6	2.4
20	22	22.52	37	35.4	3	3.6	2.4
24	26	26.52	44	42.4	4	4.6	3.4
30	33	33.62	56	54.1	4	4.6	3.4
36	39	40	66	64.1	5	6	4
42	45	46	78	76.1	8	9.2	6.8
48	52	53.2	92	89.8	8	9.2	6.8
56	62	63.2	105	102.8	10	11.2	8.8
64	70	71.2	115	112.8	10	11.2	8.8

表 G-8　粗制垫圈尺寸（非优选尺寸）　mm

公称规格（螺纹大径 d）	内径 d_1		外径 d_2		厚度 h		
	公称（min）	max	公称（max）	min	公称	max	min
3.5	3.9	4.2	8	7.1	0.5	0.6	0.4
14	15.5	15.93	28	26.7	2.5	2.8	2.2
18	20	20.43	34	32.4	3	3.6	2.4
22	24	24.52	39	37.4	3	3.6	2.4
27	30	30.52	50	48.4	4	4.6	3.4
33	36	37	60	58.1	5	6	4
39	42	43	72	70.1	6	7	5
45	48	49	85	82.8	8	9.2	6.8
52	56	57.2	98	95.8	8	9.2	6.8
60	66	67.2	110	107.8	10	11.2	8.8

附录H 混 凝 土

H.1 水泥

H.1.1 水泥的主要性质

水泥属于水硬性矿物胶结材料，当其与水或适当的盐类溶液混合后，在常温下经过一定的物理和化学变化过程，能由浆状或可塑状逐渐凝结，进而硬化具有一定的强度，并将松散材料胶结为整体。水泥除能在空气中硬化和保持强度外，还能在水中继续硬化，并长期地保持和继续提高其强度。现将水泥性质的主要内容介绍于下：

（1）比重与容重。普通水泥的比重为3.0～3.15，通常采用 3.1；容重为 1000～1600kg/m^3，通常采用1300kg/m^3。

（2）细度。细度是指水泥颗粒的粗细程度。颗粒愈细的水泥硬化愈快，早期强度愈高，但在空气中硬化时，有较大的收缩。

（3）凝结时间。水泥的凝结时间对施工有重要意义。水泥从加水（调成标准稠度）到开始凝结所需的时间称为初凝时间。已经初凝的水泥，塑性大为降低。水泥从加水到凝结完了所需的时间称为终凝时间。已经终凝的水泥才初步具有强度。

为了保证在施工中有足够的处理时间并满足施工中操作的要求，通常要求水泥的初凝时间不宜过早而终凝时间不宜过迟。

（4）标号与强度。水泥的强度等级是水泥强度大小的标志，测定指标为水泥的抗压强度，检测标准主要为水泥砂浆硬结 28d 后的强度。如检测得到 28d 后的抗压强度为 42.5MPa，则水泥的强度等级定为 42.5级或 42.5R 级。水泥有 32.5、32.5R、42.5、42.5R、52.5、52.5R、62.5、62.5R 六种强度等级。强度等级带 R 表示该水泥为早强水泥。强度等级 32.5、32.5R 的可用于一些房屋建筑。强度等级 42.5 以上的可用于建筑较大的桥梁或厂房，以及一些重要路面和制造预制构件。

（5）体积安定性。体积安定性简称安定性，是指水泥在硬化过程中体积变化的均匀性。事实上，水泥遇水后，在凝结硬化的过程中，体积必然要发生变化，但变化不能太大并应保持均匀。水泥中如果含较多的游离石灰、氧化镁或三氧化硫，就能使水泥结构产生不均匀的变形，甚至崩溃。

（6）水化热。水泥与水的作用为放热反应，随着硬化过程的进行，不断放出热量，这种热量称为水化热。水泥水化热的大小与放热的快慢，除了决定于水泥的成分外，还与水泥的细度有关，细度大的水泥，早期放热量较多。

水泥的水化热对施工应用有很大的影响。对于小断面、小体积的混凝土构件的低温施工，水化热可加快其硬化速度。但对于水坝、大型基础等大体积混凝土工程，则由于水化热积聚在内部，不易散发，内部温度上升过高，致使混凝土产生内应力而开裂或破坏。故在大体积混凝土工程中，为降低水泥的放热量，宜采用低热水泥、外掺粉煤灰等掺合料或采用各种特殊的冷却方法，使内部温度不致上升过高。

H.1.2 水泥标准

通用水泥新标准是 GB 175—2007《通用硅酸盐水泥》，2007 年 11 月 09 日发布，2008 年 06 月 01 日起正式实施。

H.1.3 一般水泥

通用硅酸盐水泥按混合材料的品种和掺量分为硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥和复合硅酸盐水泥。

H.1.3.1 硅酸盐水泥的强度等级分为 42.5、42.5R、52.5、52.5R、62.5、62.5R 六个等级。

H.1.3.2 普通硅酸盐水泥的强度等级分为 42.5、42.5R、52.5、52.5R 四个等级。

H.1.3.3 矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥的强度等级分为 32.5、32.5R、42.5、42.5R、52.5、52.5R 六个等级。

H.1.3.4 复合硅酸盐水泥的强度等级分为 32.5R、42.5、42.5R、52.5、52.5R 五个等级。

不同品种不同强度等级的通用硅酸盐水泥，其不同龄期的强度应符合表 H-1 的规定。

表 H-1　　通用硅酸盐水泥强度表　　MPa

品种	强度等级	抗压强度		抗折强度	
		3d	28d	3d	28d
硅酸盐水泥	42.5	≥17.0	≥42.5	≥3.5	≥6.5
	42.5R	≥22.0		≥4.0	
	52.5	≥23.0	≥52.5	≥4.0	≥7.0
	52.5R	≥27.0		≥5.0	
	62.5	≥28.0	≥62.5	≥5.0	≥8.0
	62.5R	≥32.0		≥5.5	

H.1.4　抗硫酸盐硅酸盐水泥

凡以适当成分的生料，烧至部分熔融，所得以硅酸钙为主要成分的特定矿物组成的熟料，加入适量石膏，磨成细粉，制成的一种具有较高抗硫酸盐性能的水硬性胶凝材料，称为抗硫酸盐硅酸盐水泥；具有抵抗中等浓度硫酸根离子的称为中抗硫酸盐硅酸盐水泥；具有抵抗较高浓度硫酸根离子的称为高抗硫酸盐硅酸盐水泥。

H.1.5　中热硅酸盐水泥、低热硅酸盐水泥和低热矿渣硅酸盐水泥

H.1.5.1　以适当成分的硅酸盐水泥熟料，加入适量石膏，磨细制成的具有中等水化热的水硬性胶凝材料，称为中热硅酸盐水泥，简称中热水泥。

H.1.5.2　以适当成分的硅酸盐水泥熟料，加入适量石膏，磨细制成的具有低水化热的水硬性胶凝材料，称为低热硅酸盐水泥，简称低热水泥。

H.1.5.3　以适当成分的硅酸盐水泥熟料，加入粒化高炉矿渣、适量石膏，磨细制成的具有低水化热的水硬性胶凝材料，称为低热矿渣硅酸盐水泥，简称低热矿渣水泥。

H.1.6　水玻璃型耐酸水泥

凡将耐酸填料（一般采用石英岩、熔融辉绿岩或陶瓷碎片）和硬化剂（一般采用氟硅酸钠）按适当配比共同粉磨，或分别粉磨后再混合均匀而制得的一种粉状物料，这种在使用时用适量的水玻璃溶液拌匀后，能在空气中结硬，并具有抵抗大多数无机酸和有机酸腐蚀能力的物料，称为水玻璃型耐酸水泥。其各项指标见表 H-2，特性、用途及注意事项见表 H-3。

表 H-2　水玻璃型耐酸水泥的品质指标

项目	品质指标
细度	4900 孔/cm² 标准筛，筛余量不得超过 15%
凝结时间	初凝不得早于 30h，终凝不得迟于 8h
抗拉强度	试锭在空气中养护 28 天后，其抗拉强度不得低于 2MPa；在硫酸内沸煮以后，抗拉强度的降低不得大于 25%
耐酸度	耐酸度应大于 91%
耐酸安定性	水泥试饼在空气中、常温酸中以及在 40%硫酸中沸煮 1h 后，应无突出物、裂纹、脱层、损坏等一切可见的缺陷
煤油吸收率	试块在空气中养护 10 天后，其煤油吸收率不得大于 15%

注　1. 摘自 JC 77—65；
2. 为了早日确定抗拉强度，允许在试体养护 10 天后即进行试验，但其强度不得低于 28 天强度指标的 90%；
3. 水玻璃型耐酸水泥尚无新标准，本表仍沿用原标准。

表 H-3　水玻璃型耐酸水泥的特性、用途及注意事项

特性	用途		注意事项
	适用范围	不适用范围	
具有对大多数无机酸和有机酸的抗腐蚀能力	适用于化工、冶金、造纸、制糖和纺织等工业部门的一般耐酸工程中。可用以制备耐酸胶泥、耐酸砂浆和耐酸混凝土等	（1）不能用于食品工业中。如必须使用时，应考虑到氟硅酸钠的毒性。应先进行产品中含氟量的化验，证明对人体无害时才许使用； （2）不能用于受氢氟酸、氟硅酸、300℃以上的热磷酸及碱性溶液（包括碱类及碱性盐类）侵蚀的工程； （3）不能用于长期受水浸润的工程； （4）不能用于受高级脂肪酸（油酸、棕榈酸等）侵蚀的工程	（1）配制耐酸胶泥、耐酸砂浆和耐酸混凝土时，须使用的水玻璃一般为硅酸钠水溶液。模数一般为 2.40～3.00，比重一般为 1.38～1.50； （2）生产单位自水泥发出之日起，须于 14 天内将水泥技术要求试验报告寄发购货单位。耐酸安定性、煤油吸收率及 28 天抗拉强度数值等，必须于 31 天内向购货单位补报； （3）运输、保管时，不得受潮和混入杂物，严禁与其他品种水泥混杂

H.2　石材

H.2.1　天然石材

凡自天然岩石中开采而得的毛料，或经加工制成块状或板状的石材，统称天然石材。岩石的地质分类分为火成岩、水成岩和变质岩三种，其造岩矿物主要是由石英、长石、云母、深色矿物、高岭土、碳酸钙、碳酸镁、白云石和石膏等所组成。岩石的生成条件，决定着各类岩石的构造特性，而岩石的构造特性又决定着岩石一系列的重要性质，因此也就决定着各种天然石材在建筑上的使用范围及条件。建筑常用天然石材的名称、性能、用途及产地见表 H-4。

表 H-4　　建筑常用天然石材的名称、性能、用途及产地

名称	主要质量指标			主要用途	主要产地
	项目		指标		
花岗石（俗称：豆渣石）	容重（kg/m³）		2500～2700	基础、桥墩、堤坝、拱石、阶石、路面、海港结构、基座、勒脚、窗盘，装饰石等	山东泰山、崂山，陕西华山，湖南衡山，安徽黄山，江苏金山（黄红色）、焦山（青白色）。浙江莫干山，北京西山等地
	强度（9.81N/cm²）	抗压	1200～2500		
		抗折	85～150		
		抗剪	130～190		
	吸水率（%）		＜1		
	膨胀系数（10⁻⁶/℃）		5.6～7.34		
	平均韧性（cm）		8		
	平均质量磨耗率（%）		11		
	耐用年限（年）		75～200		
石灰岩（俗称：青石）	容重（kg/m³）		1000～2600	墙身、桥墩、基础、阶石、路面及石灰、粉刷材料原料等	分布极广，全国各处均有，但质量相差甚大，选用时须特别注意
	强度（9.81N/cm²）	抗压	220～1400		
		抗折	18～200		
		抗剪	70～140		
	吸水率（%）		2～6		
	膨胀系数（10⁻⁶/℃）		6.75～6.77		
	平均韧性（cm）		7		
	平均质量磨耗率（%）		8		
	耐用年限（年）		20～40		
砂岩（俗称：青条石）	容重（kg/m³）		2200～2500	基础、墙身、栏杆、衬面、阶石、人行道，纪念碑及其他装饰石材等	南京钟山、浙江千里岗、山东掖县、四川等地，均以砂岩为主。山东掖县产纯白色者，名白粒岩，俗名白玉石。北京故宫的台阶即用此建造。北京人民英雄纪念碑，碑身四周十块大浮雕及其他艺术零件等，亦均采用此石。庄严巍峨，坚固美观。南京钟山者为硅质砂岸，耐久性强。四川产者则质轻，含云母及黏土层较多，故吸水性大，容易风化
	强度（9.81N/cm²）	抗压	470～1400		
		抗折	35～140		
		抗剪	85～180		
	吸水率（%）		＜10		
	膨胀系数（10⁻⁶/℃）		9.02～11.2		
	平均韧性（cm）		10		
	平均质量磨耗率（%）		12		
	耐用年限（年）		20～200		
大理岩（俗称：大理石）	容重（kg/m³）		2600～2700	装饰材料、踏步、地面、墙面、柱面、柜台、栏杆、电气绝缘板等	云南大理，湖北大冶、黄石，河北曲阳、琢县，山东掖县、莱阳，广东云浮，福建南平，江苏高资，广西桂林，浙江杭州，河南淅川，陕西潼关、洛南，北京市房山等地
	强度（9.81N/cm²）	抗压	700～1100		
		抗折	60～160		
		抗剪	70～120		
	吸水率（%）		＜1		
	膨胀系数（10⁻⁶/℃）		6.5～10.12		
	平均韧性（cm）		—		
	平均质量磨耗率（%）		—		
	耐用年限（年）		40～100		

H.2.2 石子

石子是碎石与卵石（又称砾石、河砾石、河光石）的统称。碎石一般系用花岗岩、砂岩、石英岩、玄武岩等，经人工或机械破碎而成。碎石的颗粒形状对混凝土的质量影响甚为重要，最好的颗粒形状是接近正方形的小立方体石块，片状或针形者都不宜用以拌制高标号混凝土。卵石的颗粒形状有圆卵形、纯碎石形、长条形和片形等。石子的分类及质量要求见表 H-5。

表 H-5 石子的分类及质量要求

名称	按粒径大小分类		容重（kg/m³）	质量要求
	名称	粒径（mm）		
碎石	特细碎石 细碎石 中碎石 粗碎石	5～10 10～20 20～40 40～150	约 1400～1500	有害杂质含量： 1. 黏土、泥灰、粉末等不大于 2%～3%; 2. 煤屑、云母等轻物质不大于 0.5%; 3. 硫酸盐（以 SO_3 计）不大于 1%（上列含量均以占石子的总质量计）
卵石	特细卵石 细卵石 中卵石 粗卵石	5～10 10～20 20～40 40～150	约 1600～1800	

H.3 砂

普通砂系指自然山砂、河砂而言。它是由坚硬的天然岩石经自然风化逐渐形成的疏散颗粒的混合物。普通砂的主要用途是作为细集料与胶凝材料（包括水泥、石灰、石膏等）配制成砂浆或混凝土使用。

H.4 混凝土

H.4.1 混凝土的强度

（1）混凝土的强度标准值（N/mm²）按表 H-6 采用。

表 H-6 混凝土强度标准值 N/mm²

强度种类	混凝土强度等级													
	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
轴心抗压 f_{ck}	10.0	13.4	16.7	20.1	23.4	26.8	29.6	32.4	35.5	38.5	41.5	44.5	47.4	50.2
轴心抗拉 f_{tk}	1.27	1.54	1.78	2.01	2.20	2.39	2.51	2.64	2.74	2.85	2.93	2.99	3.05	3.11

（2）混凝土的强度设计值按表 H-7 采用。

表 H-7 混凝土强度设计值 N/mm²

强度种类	混凝土强度等级													
	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
轴心抗压 f_c	7.2	9.6	11.9	14.3	16.7	19.1	21.1	23.1	25.3	27.5	29.7	31.8	33.8	35.9
轴心抗拉 f_t	0.91	1.10	1.27	1.43	1.57	1.71	1.80	1.89	1.96	2.04	2.09	2.14	2.18	2.22

H.4.2 混凝土受压或受拉时的弹性模量 E_c

E_c 按表 H-8 采用。

表 H-8 混凝土弹性模量 ×10⁴N/mm²

混凝土强度等级	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
E_c	2.20	2.55	2.80	3.00	3.15	3.25	3.35	3.45	3.55	3.60	3.65	3.70	3.75	3.80

H.4.3 混凝土外加剂

外加剂是为改进水泥净浆、砂浆和混凝土的某些性能而掺入其中的物质，又称附加剂、添加剂。外加剂依靠物理、化学或物理化学作用（如吸附、絮凝、分散、催化或与水泥中某些成分发生反应）而奏效。

混凝土外加剂的使用已有五十多年的历史，它已被公认为是提高混凝土强度及改善混凝土各种性能的有效手段。由于外加剂在混凝土工程中获得日益广泛的应用，许多地方已把它作为混凝土中除水泥、砂、石、水以外的第五种材料。近年来，随着人们对节能的重视，进一步促进了外加剂的发展。一些国家（如日本、挪威等）几乎在全部混凝土工程中采用了外加剂，且加有外加剂的商品混凝土已经出现。其他国家在混凝土工程中采用外加剂的比重也日益增加。目前世界上外加剂约有三百余种。

我国外加剂的研究和生产，近年来也得到较快的发展，目前已有数十种之多，并在建筑、铁道、交通、港口、水工等方面得到应用，收到了显著的效果。

外加剂按使用功能的分类及其主要功能见表H-9。

外加剂按化学成分分类及其主要化学成分、型号和作用见表H-10。

表 H-9 外加剂按使用功能的分类及其主要功能

种类	主要功能
减水剂	减水剂是一种表面活性剂，加入混凝土中能对水泥颗粒起分散作用，从而把水泥凝聚体中所包含的水释放出来，使水泥达到充分水化。在混凝土中掺用，可减少混凝土的用水量，降低水灰比，改善混凝土和易性，有利于泵送、滑模、喷射等混凝土新工艺的施工；在保持坍落度不变的情况下，可增加混凝土的强度；在保持混凝土抗压强度及和易性基本相同的情况下，可节约水泥；对抗渗、抗冻等各项性能均有所改善
早强剂	早强剂通过对水泥水化过程所产生的综合的物理、化学作用，能显著提高混凝土的早期强度；改善混凝土拌合物的工艺性能和硬化混凝土的物理力学性能；对混凝土工程的冬季施工很有利
加气剂	加气剂包括引气剂和发气剂。引气剂可使砂浆、混凝土中产生大量微细的均匀分布的封闭气泡，可阻塞有害的毛细孔通道，从而改善和易性，提高抗渗性、抗冻性和耐久性。发气剂加入混凝土料浆后，会与水泥中的碱反应产生气体，使之体积膨胀呈多孔结构的物质。某些金属粉末（如铝粉）、双氧水、碳化钙和漂白粉等均可作引气剂
膨胀剂	膨胀剂主要用于补偿混凝土收缩，常与减水剂一起配制地脚螺栓灌浆料、设备安装时的坐浆材料及混凝土接头等。还可用于防水工程，防止大体积混凝土的收缩裂缝。也可用于自应力混凝土，调整掺量以控制膨胀值
速凝剂	速凝剂主要用于冬季滑模施工及喷射混凝土等需要速凝的混凝土工程，也可用于抢修堵漏工程
缓凝剂	缓凝剂主要用于大体积混凝土工程的施工和某些在施工操作上需要保持较长处理混凝土时间的项目
消泡剂	又名去沫剂。对引气性较大的减水剂，在使用时须同时加入消泡剂，以消减微沫
防锈剂	又称阻锈剂或缓蚀剂。采用氯化物作早强剂时，需要同时加入防锈剂，防阻对钢筋的锈蚀

表 H-10 外加剂按化学成分分类及其主要化学成分、型号和作用

种类	主要化学成分等
木质素系	主要成分为木质素磺酸盐或其衍生物，属于天然高分子化合物。国内目前研究及应用较多的有M型、木钠、CH、JM-Ⅱ等。它是利用生产化学纤维浆或纸浆的下脚料，提取酒精后的废液经喷雾干燥而成。具有减水、增强、加气、缓凝等综合效果。可用于一般工程
磺化煤焦油系	以芳香族磺酸盐甲醛缩合物为主要成分。原料是煤焦油中各馏分，尤以萘及其同系物用得最多，此外尚有蒽、菲、古玛隆等，经磺化缩合而成。由于采用的原料及加工工艺不同，性能上也就各有差异。目前国内品种多达20余种，如NF、NNO、FDN、VNF、MF、建1、JN、HN、CU、CRS、A型、B型等等。减水、增强等效果均优于木质素系，属高效减水剂，适用于高强及流化混凝土
树脂系	以三聚氰胺甲醛缩合物为主要成分，又称密胺树脂。国内研制的有SM。这种减水剂效应较高，分散作用好，引气也很少，可降低析水性，它促进初期水泥水化作用，起到某些催化作用，也可提高耐火混凝土在高温下（1000～1200℃）的强度
糖蜜系	以蛋白质酵母残体、多种有机酸和部分残糖为主要成分。它是以糖厂生产过程中的废液（糖渣、废蜜）为原料，与石灰中和成盐的物质。除具备一般减水剂性能外，尚有相当的缓凝作用和一定的引气性。国内产品有3FG、TF、ST等。适用于大体积混凝土浇筑及夏季施工，多用于水工工程

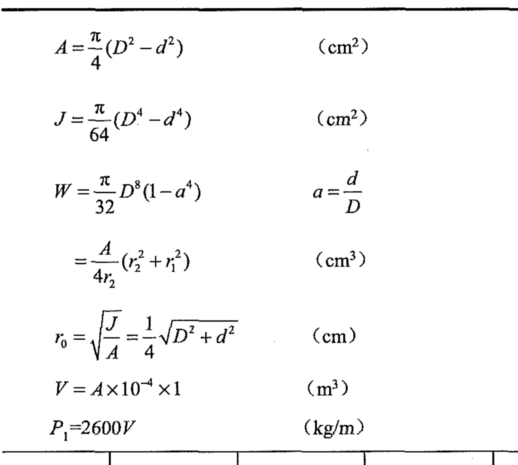
续表

种类	主要化学成分等
腐殖酸	以草炭、泥煤或褐煤等为主要原料，通过水洗碱溶、蒸发浓缩、碱式磺化、喷雾干燥等工艺过程而制得。又称胡敏酸。其主要成分为腐殖酸，是一种天然的有机高分子化合物，具有分散及乳化作用。适于作一般减水剂
复合减水剂	为了满足各种不同的施工要求及降低成本，国内外都普遍研制复合外加剂。如用 MF 与消泡剂复合使用，可以弥补单掺 MF 时后期强度降低的缺点。又如用 UNF–2 与 Na_2SO_4、三乙醇胺复合，可作为早强剂，用 NC 混凝土早强剂与硫酸钠和糖钙复合，可有效地在负温下使用等

H.5　环形截面钢筋混凝土电杆截面特性数据

环形截面钢筋混凝土电杆截面特性数据见表 H-11。

表 H-11　　环形截面钢筋混凝土电杆截面特性



$A=\frac{\pi}{4}(D^2-d^2)$　　（cm^2）

$J=\frac{\pi}{64}(D^4-d^4)$　　（cm^2）

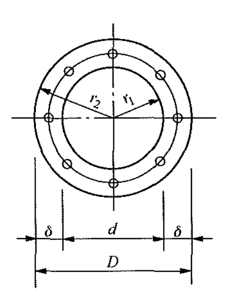
$W=\frac{\pi}{32}D^8(1-a^4)$　　$a=\frac{d}{D}$

$\quad=\frac{A}{4r_2}(r_2^2+r_1^2)$　　（cm^3）

$r_0=\sqrt{\frac{J}{A}}=\frac{1}{4}\sqrt{D^2+d^2}$　　（cm）

$V=A\times10^{-4}\times1$　　（m^3）

$P_1=2600V$　　（kg/m）



D	d	δ	A	J	W	r_0	V	G
20	12	4.0	201	7147	683	5.96	0.020	52
	11	4.5	219	7260	713	5.76	0.022	57
	10	5.0	235	7360	736	5.59	0.024	61
25	17	4.0	246	15080	1206	7.56	0.026	69
	16	4.5	295	16000	1270	7.36	0.030	77
	15	5.0	314	16700	1335	7.29	0.031	82
30	22	4.0	327	28300	1900	9.30	0.033	85
	21	4.5	361	30200	2010	9.15	0.036	94
	20	5.0	392	32400	2120	9.08	0.039	102
40	32	4.0	453	74200	3710	12.81	0.045	118
	30	5.0	550	85900	4295	12.50	0.055	143
	28	6.0	640	95200	4795	12.20	0.064	167
55	45	5.0	785	247770	9110	17.77	0.079	204
	39	8.0	1180	335490	12210	16.86	0.118	306
	35	10.0	1413	375330	13360	16.30	0.141	367

附录I 建筑材料质量

建筑材料质量见表I-1。

表I-1 建筑材料质量

名称	质量（kg/m^3）	备注
1.木材： 杉木	＜400	质量随含水率而不同
冷杉、云杉、红松、华山松、樟子松、铁杉、拟赤杨、红椿、杨木、枫杨	400～500	质量随含水率而不同
马尾松、云南松、油松、赤松、广东松、桤木、枫香、柳木、檫木、秦岭落叶松、新疆落叶松	500～600	质量随含水率而不同
东北落叶松、陆均松、榆木、桦木、水曲柳、苦楝、木荷、臭椿	600～700	质量随含水率而不同
椎木（栲木）、石栎、槐木、乌墨	700～800	质量随含水率而不同
青冈栎（楮木）、栎木（柞木）、桉树、木麻黄	＞800	质量随含水率而不同
2. 土、砂、砂砾、岩石： 腐殖土	1500～1600	干，φ=40°；湿，φ=35°；很湿φ=25
黏土	1350	干，松，孔隙比为1.0
黏土	1600	干，φ=40°，压实
黏土	1800	湿，φ=35°，压实
黏土	2000	很湿φ=25°，压实
砂土	1220	干，松
砂土	1600	干，φ=35°，压实
砂土	1800	湿，φ=35°，压实
砂土	2000	很湿φ=25°，压实
砂子	1400	干，细砂
砂子	1700	干，粗砂
卵石	1600～1800	干
黏土夹卵石	1700～1800	干，松
砂夹卵石	1500～1700	干，松
砂夹卵石	1600～1920	干，压实
砂夹卵石	1890～1920	湿
浮石	600～800	干
浮石填充料	400～600	
砂岩	2360	
页岩	2800	
页岩	1480	片石堆置

续表

名 称	质量（kg/m³）	备 注
泥灰石	1400	φ=40°
花岗岩、大理石	2800	
花岗石	1540	片石堆置
石灰石	2640	
石灰石	1520	片石堆置
贝壳石灰岩	1400	
白云石	1600	片石堆置，φ=48°
滑石	2710	
火石（燧石）	3520	
云斑石	2760	
玄武岩	2950	
长石	2550	
角闪石，绿石	3000	
角闪石，绿石	1710	片石堆置
碎石子	1400～1500	堆置
岩粉	1600	黏土质石炭质的
多孔黏土	500～800	作填充料用，φ=35°
硅藻土填充料	400～600	
辉绿岩板	2950	
3.石灰、水泥、灰浆、混凝土及水： 生石灰块	1100	堆置，φ=30°
生石灰粉	1200	堆置，φ=35°
熟石灰膏	1350	
石灰砂浆，混合砂浆	1700	
水泥石灰焦渣砂浆	1400	
灰土	1750	石灰：土=3:7，夯实
稻草石灰泥	1600	
纸筋石灰泥	1600	
石灰锯末	340	1:3，松
石灰三合土	1750	石灰、砂子、卵石
水泥	1250	轻质松散，φ=20°
水泥	1450	散装，φ=30°
水泥	1600	袋装压实，φ=40°
矿渣水泥	1450	
水泥砂浆	2000	
水泥蛭石砂浆	500～800	

续表

名　　称	质量（kg/m³）	备　　注
石棉水泥浆	1900	
膨胀珍珠岩砂浆	700～1500	
石膏砂浆	1200	
碎砖混凝土	1850	
素混凝土	2200～2400	振捣或不振捣
矿渣混凝土	2000	
焦渣混凝土	1600～1700	承重用
焦渣混凝土	1000～1400	填充用
铁屑混凝土	2800～6500	
浮石混凝土	900～1400	
沥青混凝土	2000	
无砂大孔混凝土	1600～1900	
泡沫混凝土	400～600	
加气混凝土	550～750	单块
钢筋混凝土	2400～2500	
碎砖钢筋混凝土	2000	
钢丝网混凝土	2500	用于承重结构
水玻璃耐酸混凝土	2000～2350	
粉煤灰陶粒混凝土	1950	
水	1000	温度 4℃，密度最大时
冰	896	
4.金属矿产： 铸铁	7250	
锻铁	7750	
铁矿渣	2760	
赤铁矿	2500～3000	
钢	7850	
紫钢、赤铜	8900	
黄铜、青铜	8500	
硫化铜矿	4200	
铝	2700	
铝合金	2800	
锌	7050	

注　φ——土的内摩阻角。

主要量的符号及其计量单位

量的名称	符号	计量单位	量的名称	符号	计量单位
长度、档距、电感	L（l）	m、H	刚度	EI	kPa
高度	H（h）	m	偏心距	e	m
半径、电阻、构件的抗力	R（r）	m、Ω、N	电压	U	V
直径、距离、宽度	D（d）	m	电场强度、弹性模量	E	kV/m、N/mm^2
应力	σ	N/mm^2	阻抗	Z	Ω
厚度	δ	m	电容	C	F
面积	A	m^2	电流	I	A
风速	V	m/s	无线电干扰值	N	dB
风压	w_0	kN/m^2	磁感应强度	B	mT
电阻率	ρ	Ω·m	电线比载	g	N/（m·mm^2）
体积	V	m^3	爬电比距、绝缘子串长	λ	cm/kV、m
力	F	N	波长	λ_m	m
力矩、扭矩	M	N·m	角频率	ω	rad/s
压力	p	Pa	电线风偏角	φ	（°）
热力学温度、电线张力	T	K、N	不平衡张力	ΔT	N
摄氏温度	t	℃	功率、电线的单位重	P	W、kg/m
温升（温差）	Δt	℃	电能	W	kW·h
热量	Q	J	地基变形量	S	mm
弧垂、频率	f	m、Hz	抗拉强度	f_g、f_t	N/mm^2

参 考 文 献

[1] Carson J R. Wave propagation in overhead wires with ground return [J]. Bell Labs Technical Journal，1926，5：539-554.

[2] Deri A，Tevan G，Semlyen A，et al. The Complex Ground Return Plane a Simplified Model for Homogeneous and Multi-Layer Earth Return [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems，1981，100（8）：3686-3693.

[3] C. I. S. P. R Publication Document 18-1，1982，Radio Interference Characteristics of Overhead Power Lines and Highvoltage Equipment Partl，Description of Phenomena.

[4] C. I. S. P. R Publication Feb. 1984，Document 18，Radio interference from Overhead Power Lines and High-voltage Equipment，Part II-Methods of Measurement and Procedure for Determining Limits，Part III-Code of Practice for Minimising The Generation of Radio Noise.

[5] Burgsdorf V V，Egorov L V，Emeljana N P，et al. Corona Investgation on Extra high Vlotage Overhead Lines，CIGRE，1960，N413.

[6] 马绍骏. 论 50 万伏超高压线的电磁污染 [J]. 中国环境科学，1982 年第 4 期.

[7] 500kV 送变电设备の实证试验报告. その 4，静电诱导とコロナ杂音，500kV 送电实证试验研究委员会，昭和 47 年 4 月.

[8] 余克千. 220kV 渔金高压输电线路无线电干扰测试分析 [J]. 中国电力，1985（1）：15-21.

[9] 马绍骏. 500kV 输电线路对无线电干扰（RI）的情况反馈 [J]. 吉林电力技术，1986（4）：30，44-49.

[10] Anderson J G. Transmission line reference book 345 kV and above [M]. Beijing：Power Industry Press，1982.

[11] CISPR18-3-am1. Formulae for the predetermination of the radio noise level produced by large conductor bundles （more than four sub-conductors） and by tubular conductors. 1996.

[12] Bd Haussmann. Interference produced by corona effect of electric systems [R]. International conference on large high voltage electric systems. Paris：CIGRE Committee Report，1974.

[13] Giao Trinh N，Sarma Maruvada P. A method of predicting the corona performance of conductor bundles based on cage test results. IEEE Trans，1977，PAS-96（1）：312-325.

[14] 马绍骏. 高压输电线与收信台合理间距的计算 [J]. 中国电力，1985（2）：41-45.

[15] 白瑞纳克 L L. 声学 [M]. 章启馥，等，译. 北京：高等教育出版社，1959.

[16] 马绍骏. 架空线路变电所对电视差（收）转台干扰防护间距的研究 [J]. 电力建设，1990（12）：1-9.

[17] Combes M G，Carberry R E. A Comparison of Methods for Calculating Audible Noise of High Voltage Transmission Lines [J]. IEEE Transaction Power Apparatus and Systems，1982（101）：4090-4099.

[18] Chartier V L，Blair D E. Effect of bundle orientation on transmission line audible and radio noise [J]. IEEE Transactions on Power Delivery，1994，9（3）：1538-1544.

[19] Lundquist J，Boveri A B. Results from AC transmission line audible noise studies at the Anneberg EHV Test Station [J]. IEEE Transaction Power Delivery，1990，5（1）：317-323.

[20] Olsen R G，Stimson B. Predicting VHF/UHF Electromagnetic Noise from Corona on Power-line Conductors [J]. IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility，2002，30（1）：13-22.

[21] 安德生 J G，等. 345 千伏及以上超高压输电线路设计参考手册 [M]. 电力工业部武汉高压研究所译. 北京：电力工业出版社，1981.

[22] 陈健渝. 超高压输电线路的电磁辐射影响综述 [J]. 电力科技与保护，1998（4）：30-37.

[23] 胡白雪. 超高压及特高压输电线路的电磁环境研究 [D]. 杭州：浙江大学，2006.

[24] 马志民. 工频高压电场的生物因素影响及防护 [Z/OL]. http：//www. bjkp. gov. cn/zhuanti/old_bjkp/wskpx/k21146-03. htm

[25] 捷亚科夫 A Φ. 工频电磁场对人体健康的影响 [J]. 国际电力，1997（4）：61-62.

[26] 国际大电网会议第 36. 01 工作组. 输电系统产生的电场和磁场 [M]. 邵方殷，等，译. 北京：水利电力出版社，1984.

[27] 刘继. 电气装置的过电压保护 [M]. 北京：电力工业出版社，1982.

[28] 机械工程手册　电机工程手册编委会. 电机工程手册　第 27 篇　绝缘子 [M]. 北京：机械工业出版社，1978.

[29] 清华大学，西安交通大学. 高电压绝缘 [M]. 北京：电力工业出版社，1980.

[30] 列克山德洛夫　Γ H，等. 高电压外绝缘的电气强度 [M]. 一机部高压电器研究所，译. 北京：机械工业出版社，1977.

[31] 机械工程手册 电机工程手册编委会. 电机工程手册 第 3 篇高电压技术：试用本 [M]. 北京：机械工业出版社，1978.

[32] 重庆大学，南京工学院. 高电压技术 [M]. 北京：电力工业出版社，1981.

[33] IEEE committee report. Switching Surges，Part III：Field and Analyzer Results for Transmission Lines Past，Present and Future Trends [R]. Power Apparatus & systems IEEE Transactions on，1970，pas-89 （2） ：173-189.

[34] 史六如. 220kV 开关切合空载长线时过电压测量结果的分析 [J]. 电网技术，1979（2）：21-27.

[35] 阿列克山德洛夫　Γ H，等. 超高压送电线路的设计 [M]. 东北电力设计院送电室，译. 北京：水利电力出版社，1987.

[36] 迪森朵夫　W. 高压电力系统的绝缘配合 [M]. 东北电力设计院送电室，译. 北京：水利电力出版社，1976.

[37] 米里尼科夫 H A，等. 330～500kV 架空输电线路电气部分的设计 [M]. 湖北省高电压协作组、华东电力设计院系统室，译，北京：水利电力出版社，1977.

[38] 王来. 500 千伏输电线路塔头绝缘的试验研究 [J]. 电网技术，1982（1）：1-19.

[39] 安德生 J G，等. 超高压输电线路 [M]. 西南电力设计院，北京电力设计院，译. 北京：水利电力出版社，1979.

[40] 佚名. 高电压试验技术译文集 [M]. 西安高压电器研究所，译. 北京：机械工业出版社，1974.

[41] 北京电力试验研究所，等. 500kV 晋京线输电杆塔绝缘电气特性试验报告 [J]. 北京电力技术，1979（1）：3-18.

[42] Kawai M，Yasui M，Kishizima I. Full scale Tests in Japan on 500kV Transmission Line Insulation [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems，1969，PAS-88（2）：133-140.

[43] T. Udo，Sparkover characteristics of Large Gap Spaces and Long Insulation Strings，IEEE PAS 83 1964，No5.

[44] 解广润. 过电压及保护 [M]. 北京：水利电力出版社，1980.

[45] ЕЗСРОССИИ.Руководствопоэаш ите эдектрическихсетей6 ~1150квотгроэовыхивнутреннихперенапря жений [M]. 1999.

[46] 解广润. 电力系统过电压 [M]. 北京：水利电力出版社，1985.

[47] 迪森朵夫　W. 高压电力系统的绝缘配合 [M]. 东北电力设计院送电室，译. 北京：水利电力出版社，1976.

[48] 岳灵平，陆利平，章旭泳，等. ±500kV 宜华直流输电线路雷电性能评估研究 [J]. 电网技术，2012（7），161-165.

[49] 伏进. 特高压直流输电线路耐雷性能分析方法研究 [D]. 重庆大学，2009.

[50] Whitehead JT，Chisholm W A Anderson J G，et al. Estimating lightning performance of transmission line 2—Updates to analytical models [J]. IEEE Transactions on Power Delivery，1993，8（3）：1254-1267.

[51] 王洪泽，杨丹，王梦云. 电力系统接地技术手册 [M]. 北京：中国电力出版社，2007.

[52] 曾永林. 接地技术 [M]. 北京：水利电力出版社，1979.

[53] Ekonomou L，Iracleous D P，Gonos I F，etal. An optimal design method for improving the lightning performance of overhead high voltage transmission lines [J]. Electric Power Systems Research，2006，76（6）：493-499.

[54] Wagne r C F. A New Approach to the Calculation of the Lightning Performance of Transmission Lines [J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers Part III Power Apparatus & Systems，1956，75（3）.

[55] 李长旭. 输电线路防雷性能研究 [D]. 吉林：东北电力大学，2008.

[56] 王汉斌. 架空地线降耗措施及其对线路参数影响 [J]. 红水河，2010，29（3）：113-116.

[57] Wagner C F，Hileman A R. The lightning stroke-II [J]. Power Apparatus and Systems，Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers，1961，80（3）：622-636.

[58] Young F S，Clayton J M，Hileman A R. Shielding of transmission lines [J]. Power Apparatus and Systems，IEEE Trans on，1963，82：132-154.

[59] 朱木美. 架空地线的保护范围及绕击率的计算 [J]. 华中工学院学报，1965，5（8）：1～14.

[60] Armstrong H R，Whitehead E R. Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding [J]. Power Apparatus and Systems，IEEE Transactions on，1968，PAS-87（1）：270-281.

[61] Brown G W，Whitehead E R. Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding：Part II [J]. Power Apparatus and Systems，IEEE Transactions on，1969，PAS-88（5）：617-626.

[62] Love E R. Improvements in Lightning Stroke Modeling and Applications to the Design of EHV and UHV Transmission Lines [D]. Colorado：University of Colorado，1973.

[63] Whitehead E R. CIGRE survey of the lightning performance of extra-high-voltage transmission lines [J]. Electra，1974，33（2）：63-89.

[64] Anderson J D. Transmission Line Reference Book 345kV and Above [M]. Electric Power Research Institute，Palo Alto，CA，1982.

[65] IEEE Working Group on Lightning Performance of Transmission Lines. A simplified method for estimating lightning performance of transmission lines [J]. IEEE Transaction on power apparatus and systems，1985，104（4）：919-932.

[66] Mousa A M，Srivastava K D. Modelling of power lines in lightning incidence calculations [J]. IEEE Transactions on Power Delivery，1990，5（1）：303-310.

[67] Taniguchi S，Tsuboi T，Okabe S，et al. Improved method of calculating lightning stroke rate to large-sized transmission lines based on electric geometry model [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation，2010，17（1）：53-62.

[68] 师伟. 雷击特高压输电线路先导连接过程数值模拟研究 [D]. 济南：山东大学，2015.

[69] 陈家宏，张勤，冯万兴，等. 中国电网雷电定位系统与雷电监测网 [J]. 高电压技术，2008，34（3）：425-431.

[70] 邵建人. 铜地网对土壤重金属污染的评估与环保对策 [R]. 2009 年重金属污染监测风险评价及修复技术高级研讨会，2009.

[71] Hill H L，Capon A S，Ratz O，et al. Transmission line reference book HVDC to ±600kV [M]. USA：EPRI and BPA，1977.

[72] 赵畹君. 高压直流输电工程技术 [M]. 2 版. 北京：中国电力出版社，2012.

[73] High Voltage Transmission Research Center. HVDC transmission line reference book [R]. USA：High Voltage Transmission Research Center，1993.

[74] Corbellini U，Pelacchi P. Corona losses in HVDC bipolar lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery，2002，11（3）：1475-1480.

[75] 何仰赞，温增银. 电力系统分析 [M]. 3 版. 武汉：华中科技大学出版社，2002.

[76] Sarma M P，Janischewskyj W. Analysis of corona losses on DC transmission lines：I-Unipolar lines [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems，1969，88（5）：718-731.

[77] Norrie D H，DeVries G. An Introduction to the finite Element Analysis [M]. New York：Academic Press，1978.

[78] Janischewskyj W，Maruvada P Sarma，Gela G . Corona losses and ionized fields of HVDC transmission lines [J]. CIGRE Paper，1982，36（9）.

[79] Janischewskyj W，Gela G. Finite Element Solution for Electric Fields of Coronating DC Transmission Lines [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems，1979，98（3）：1000-1016.

[80] Gela G. Computation of Ionized Fields Associated with unipolar DC Transmission Systems [D]. Toronto，University of Toronto，Canada，1980.

[81] Takuma T，Ikeda T，Kawamoto T. Calculation of ion flow fields of HVDC transmission lines by the finite element method [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems，1981，100（12）：4802-4810.

[82] 邬雄，万保全. 输变电工程的电磁环境 [M]. 北京：中国电力出版社，2009.

[83] 饶宏. 高海拔特高压直流输电工程电磁环境 [M]. 北京：中国电力出版社，2015.

[84] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑 [M]. 北京：中国电力出版社，2006.

[85] 张仁豫，关志成. 染污绝缘子在交流及正负极性直流电压作用下污闪电压差异的研究 [J]. 高电压技术，1984（2）：4-10.

[86] 孙成秋，武方忠，孙成春. 新型悬式瓷复合绝缘子 [J]. 电磁避雷器，2006（2）：22～23.
[87] 关志成，等. 绝缘子及输变电设备外绝缘 [M]. 北京：清华大学出版社，2006.
[88] 周刚，李力，刘仲全. ±800 kV 直流架空输电线路绝缘选择[J]. 高电压技术，2009，35（2）：231～235.
[89] 张福增，赵锋，杨皓麟，等. 高海拔直流线路大吨位绝缘子配置方法研究 [J]. 中国电机工程学报，2008（34）：21～28.
[90] 付斌. 影响直流线路防污设计的各种因素 [J]. 高电压技术，1995，21（4）：55～58.
[91] 张志劲. 蒋兴良，孙才新，等. 低气压下复合绝缘子长串直流污闪特性[J]. 高电压技术，2008，34（8）：1644～1649.
[92] 关志成，彭功茂，张福增，等. 复合绝缘子自然污秽与人工污秽试验的等价性分析 [J]. 高电压技术，2010，36（8）：1871～1876.
[93] 王向朋，周军. 特高压直流用绝缘子污闪特性研究概况 [J]. 企业技术开发，2010，29（15）：31～33.
[94] 张福增，杨皓麟，赵锋，等. 线路绝缘子直流污闪电压修正研究 [J]. 高电压技术，2008，34（3）：451～454.
[95] 中国电力科学研究院. 特高压输电技术直流输电分册 [M]. 北京：中国电力出版社，2012.
[96] 薛春林，吴巾克，叶鸿声. 三沪直流输电线路工程绝缘配合及绝缘子选型研究 [J]. 电力建设，2007，28（11）：14～17.
[97] 刘振亚. 特高压直流外绝缘技术 [M]. 北京：中国电力出版社，2009.
[98] 张翠霞，葛栋，殷禹. 直流输电系统的防雷保护 [J]. 高电压技术，2008，34（10）：2070-2074.
[99] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册 [M]. 2 版. 北京：中国电力出版社，2002.
[100] 朱瑞兆. 风压计算的研究 [M]. 北京：科学出版社，1976.
[101] 余虹云. 耐热导线应用技术 [M]. 北京：中国电力出版社，2008.
[102] 邵天晓. 架空送电线路的电线力学计算[M]. 2 版. 北京：中国电力出版社，2003.
[103] 中国电机工程学会 1964 年输电线路导线、金具学术会议论文选集编辑小组. . 中国电机工程学会 1964 年输电线路导线、金具学术会议论文选集 [M]. 北京：中国工业出版社，1966.
[104] 薄通. 架空送电线路连续倾斜档距的架线问题 [J]. 中国电力，1959（4）：42-47.
[105] 郑玉琪，薄通，潘忠华，等. 架空输电线微风振动 [M]. 北京：水利电力出版社，1987.
[106] 潘忠华. 论分裂导线的防振 [J]. 电力建设，1986（9）：12-17.
[107] Poffenberger J C， Swart R L. Differential Displacement and Dynamic Conductor Strain [J]. Power Apparatus & Systems IEEE Transactions on，1965，84（4）：281-289.
[108] 泽利琴科 A C，斯米尔诺夫 Б И. 超高压架空线路机械部分设计 [M]. 李广泽，等，译. 北京：水利电力出版社，1986.
[109] 亚历山大罗夫 Г Н，等. 超高压送电线路的设计 [M]. 翁之盛，倪宗德，张洞明，等，译. 北京：水利电力出版社，1987.
[110] 庞廷智，崔鼎新，孙鼎，等. 电力线路对电信线路的影响和保护 [M]. 北京：水利电力出版社，1987.
[111] 赵畹君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京：中国电力出版社，2015.
[112] 熊万州. ±800 kV 直流输电等效干扰电流指标分析 [J]. 电网技术，2008，32（2）：81-84;
[113] 黄莹，孙帮新，黎小林，等. 云广±800kV 直流输电工程直流等效干扰电流限值研究[J]. 南方电网技术，2007，1（1）：32-36.
[114] 于泓. GYB 通信电缆过电压保安器研制与及应用 [J]. 中国电力，1989（8）：69-71.
[115] 董吉谔. 电力金具手册 [M]. 3 版. 北京：中国电力出版社，2010.
[116] 国家电力公司东北电力设计院. 电力工程高压送电线路设计手册 [M]. 北京：中国电力出版社，2002.
[117] 钢结构设计手册编辑委员会. 钢结构设计手册 [M]. 3 版. 北京：中国建筑工业出版社，2004.
[118] 王文栋. 混凝土结构构造手册 [M]. 3 版. 北京：中国建筑工业出版社，2003.
[119] 吴德安. 混凝土结构计算手册 [M]. 3 版. 北京：中国建筑工业出版社，2002.
[120] 刘金砺，高文生，邱明兵. 建筑桩基技术规范应用手册[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2010.
[121] 史佩栋. 桩基工程手册：桩和桩基础手册 [M]. 北京：人民交通出版社，2008.
[122] 李守巨. 混凝土结构设计规范释义与应用 [M]. 北京：化学工业出版社，2012.
[123]《建筑结构经理计算手册》编写组. 建筑结构静力计算手册 [M]. 2 版. 北京：中国建筑工业出版社，1998.
[124] 吴勇明. 钢筋砼双向板弯矩系数的简捷计算方

法[J]. 华南理工大学学报（自然科学版），1995（1）：76-82.

[125] 马志坚，傅春蘅. 500kV 紧凑型输电线路技术应用研究 [J]. 电力建设，2005，26（10）：26-29.

[126] 李晓琴，朱庚富. 我国紧凑型输电线路的现状和展望[J]. 山西建筑，2007，33（34）：177-178.

[127] 傅春蘅，秦庆芝. 500kV 同塔双回紧凑型塔[J]. 电力建设，2002，23（6）：23-25.

[128] 金西平. 微地形微气候对输电线路覆冰的影响. 自然灾害对电力设施的影响与应对研讨会报告集 [C]. 2008.

[129] 王守礼，李家垣. 云南高海拔地区电线覆冰问题研究 [M]. 昆明：云南科技出版社，1993.

[130] 电力工业部电力规划设计总院. 电力系统设计手册 [M]. 北京：中国电力出版社，1998.

[131] Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society. IEEE guide for improving the lightning performance of transmission lines [M]. New York：The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc，1997.

[132] 邵天晓. 架空送电线路的电线力学计算[M]. 2 版. 北京：中国电力出版社，2003.

[133] 郑玉琪，薄通，潘忠华，等. 架空输电线微风振动 [M]. 北京：水利电力出版社，1987.

[134] 徐乃管，王景朝. 500 kV 线路大跨越分裂导线防振试验研究 [J]. 电力建设，1994，15（11）：2-5.